



TITLE:

区画火災に曝される含湿区画壁の
温度上昇簡易予測手法(
Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

水上, 点晴

CITATION:

水上, 点晴. 区画火災に曝される含湿区画壁の温度上昇簡易予測手法. 京都大学, 2012, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2012-03-26

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k16827>

RIGHT:

区画火災に曝される含湿区画壁の温度上昇簡易予測手法

水 上 点 晴

目次

第1章 序章

1.1 研究の背景	1
1.1.1 日常業務からの課題	1
1.1.2 時事問題からの課題	2
1.2 既往研究の整理	4
1.2.1 耐火試験の数値解析手法についての既往研究	4
1.2.2 耐火試験の簡易予測手法についての既往研究	6
1.3 研究の目的	9
1.4 本論文の構成	10

第2章 標準加熱曲線下における土壁の加熱実験

2.1 実験の目的	13
2.2 試験体概要	13
2.3 実験方法	17
2.4 実験結果（温度測定履歴）	17
2.4.1 A面加熱	18
2.4.2 B面加熱	23
2.5 実験結果（内部温度分布）	28
2.6 考察	35
2.7 まとめ	42

第3章 加熱温度一定の条件下における土壁の温度簡易予測式

3.1 含湿壁の温度上昇時間について簡易予測手法の提案	43
3.2 乾燥壁の温度上昇簡易予測モデル	45
3.3 水分蒸発簡易予測モデル	50
3.4 数値解析による検討課題	55
3.4.1 数値解析モデルの概要	55
3.5 乾燥壁の温度上昇簡易予測モデルについて数値解析による妥当性の検証	59
3.5.1 表面温度を加熱温度で近似することの妥当性の検証	59
3.5.1.1 計算条件	59
3.5.1.2 計算結果	60
3.5.2 有限の厚さを持つ壁を半無限固体で近似することの妥当性の検証	63
3.5.2.1 計算条件	63
3.5.2.2 計算結果	64
3.6 水分蒸発の簡易予測モデルについて数値解析による妥当性の検証	69
3.6.1 簡易予測モデルに合わせた節点距離の算定	69

3.6.1.1 計算条件	69
3.6.1.2 計算結果	69
3.6.2 蒸発時間の簡易予測式について妥当性の検証	73
3.6.2.1 計算条件	73
3.6.2.2 計算結果	73
3.6.3 比例定数 D の算出	74
3.6.4 含湿壁の温度上昇時間について妥当性の検証	76
3.6.4.1 計算条件	76
3.6.4.2 計算結果	77
3.7 簡易予測モデルの適用範囲	79
3.7.1 温度上昇モデルの適用範囲	79
3.7.2 水分蒸発モデルの適用範囲	81
3.8 まとめ	82

第 4 章 標準加熱曲線下における土壁の温度簡易予測式

4.1 等価加熱温度の算定	83
4.2 乾燥壁の温度上昇時間の簡易予測式	85
4.2.1 乾燥壁の温度上昇時間について妥当性の検証	86
4.2.1.1 計算条件	86
4.2.1.2 計算結果	87
4.3 蒸発時間の簡易予測式	90
4.3.1 蒸発時間について妥当性の検証	91
4.3.1.1 計算条件	91
4.3.1.2 計算結果	91
4.4 含湿壁の温度上昇時間について妥当性の検証	93
4.4.1 計算条件と実験条件	93
4.4.2 計算結果と実験値の比較	94
4.5 乾燥壁の温度上昇の簡易予測式	97
4.5.1 計算条件	99
4.5.2 計算結果	99
4.6 含湿壁の温度上昇の簡易予測式	101
4.6.1 計算条件と実験条件	104
4.6.2 計算結果と実験値の比較	104
4.7 熱拡散率の推定	107
4.7.1 推定熱拡散率の温度依存性	107
4.7.2 推定熱拡散率と加熱面からの距離の関係	108
4.8 既往研究との比較	109
4.8.1 水分蒸発モデルの比較	109
4.8.2 温度上昇モデルの比較	110
4.9 まとめ	111

第5章 異なる加熱曲線下における石膏ボードの温度簡易予測式

5.1 壁体の主要構成材料の抽出	112
5.2 石膏ボードの加熱実験	114
5.2.1 試験体概要	114
5.2.2 実験方法	115
5.2.3 実験結果	115
5.2.4 考察	117
5.3 石膏ボード単層壁に対して簡易予測式の改良	118
5.3.1 等価含水率の導入	118
5.3.2 蒸発時間の簡易予測式	119
5.3.3 石膏ボード単層壁の温度上昇の簡易予測式	120
5.4 石膏ボード単層壁について妥当性の検証	123
5.4.1 計算条件と実験条件	123
5.4.2 計算結果と実験値の比較	124
5.5 推定熱拡散率と文献値の比較	130
5.6 まとめ	131

第6章 加熱温度一定の条件下における含湿壁の非定常温度分布

6.1 乾燥壁の非定常温度分布から流入熱流束の算出	132
6.2 蒸発到達点の簡易予測式	136
6.2.1 数値解析による検討	136
6.2.1.1 計算条件	136
6.2.1.2 計算結果	136
6.2.2 蒸発到達点の簡易予測モデル	139
6.2.3 蒸発到達点の妥当性の検証	143
6.2.3.1 計算条件	143
6.2.3.2 計算結果	143
6.3 含湿壁の非定常温度分布の簡易予測式	146
6.3.1 含湿壁の非定常温度分布について妥当性の検証	150
6.3.1.1 計算条件	150
6.3.1.2 計算結果	150
6.4 まとめ	153

第7章 研究成果・結論

7.1 加熱温度一定の条件下における土壁の温度簡易予測式に関して	154
7.2 標準加熱曲線下における土壁の温度簡易予測式に関して	157
7.3 異なる加熱曲線下における石膏ボードの温度簡易予測式に関して	157
7.4 加熱温度一定の条件下における含湿壁の非定常温度分布に関して	158
7.5 簡易予測式の適用範囲に関して	159
7.6 結論	159

(謝辞)	160
(引用・参考文献)	161

第1章 序章

1.1 研究の背景

1.1.1 日常業務からの課題

耐火試験結果の一般性にむけて

防火材料・防火構造等に関する国土交通（元建設）大臣による認定制度は、1955年4月に建築基準法の一部が改正され、耐火構造・耐火建築物・不燃材料の規定や特殊建築物の内装制限などが制定されたのを機に始まった。1965年12月には、防耐火構造・材料等の試験方法が整備され、防火性能審議会での技術的審査を経て、建設省に申請される方式が確立された。そして2000年の建築基準法の改正で、建築基準の性能規定化が推し進められるに伴い、大臣認定のための性能評価制度の門戸が、国土交通大臣の認可を受けた指定性能評価機関に広げられ現在に至る。これにより、評価員のエキスパートジャッジによっていた性能評価の審査が、国から認可を受けた業務方法書にしたがって行われるようになり、審査内容が明確にされることとなった。いわば、仕様規定という土台の上に、耐火試験による個別認定が付加された形である。

私が従事するこの耐火試験とは、標準加熱曲線として定められた単一の加熱条件下における耐火性能を、壁や床といった部材ごとに、実大の試験体を用いて確認するものである。そのため耐火試験にかかる費用は、実大の試験体製作費に、燃料費を含めた耐火試験費用が加わり、高額なものとなっている。

また耐火性能とは、要求耐火時間（はりや柱の場合：60分・120分・180分）の加熱を行い、構造部材の場合その安定性（非損傷性）が、区画構成部材の場合その延焼防止性（遮熱性・遮炎性）が、加熱終了時まで要求されるのはもちろんのこと、「耐火構造物は火災終了後も倒壊しないこと」と定めた日本独自の防耐火政策により、加熱終了後もある一定の期間保たれることとされている。このため耐火試験は破壊試験でありながら、余力を残した状態で加熱を終了させ、終局的な性能を得ることが出来ない（図1-1-1）。これに対し、不合格時の測定温度データからは終局時の状態が読み取れるが、便宜的に設けられた要求耐火時間に対する合否判定のみが主題であるために、この時間に1分1秒でも満たない場合は認定を受けることが出来ない。この場合、終局的な性能は得られているわけだから、厚みや組成を変えて再度耐火試験に挑戦するわけだが、耐火試験はコストがかさむため、このように不合格になったものの改良や、試験を受ける前の開発段階において、素材や厚み等の選択の根拠として既存の耐火試験データや、小型の模型試験を活用した温度予測手法があれば便利である。

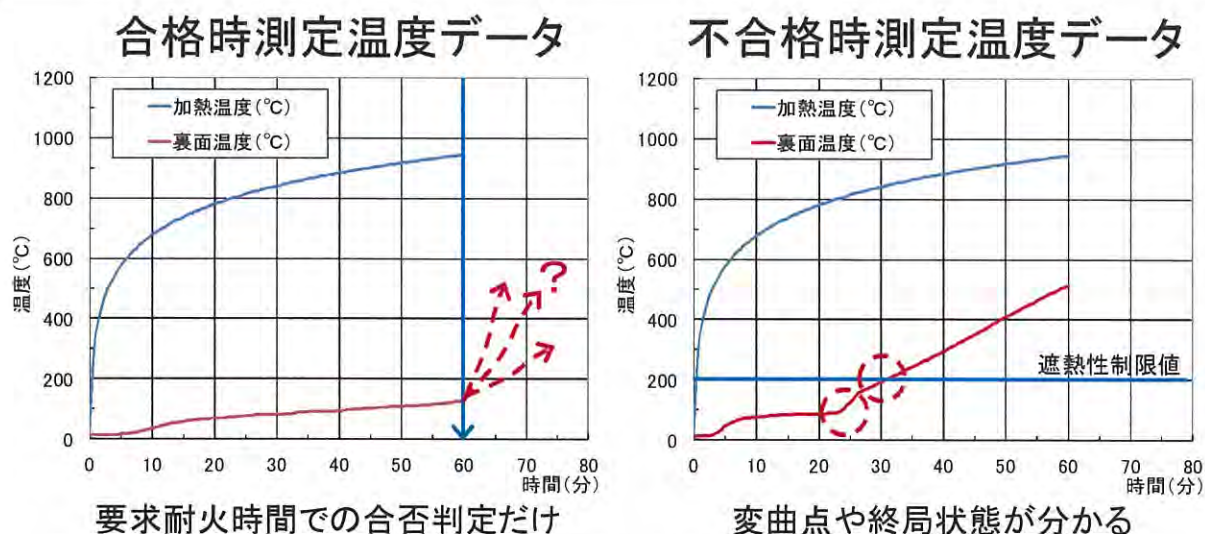


図 1-1-1 測定温度データの一例

また耐火試験は、屋内火災を想定した標準加熱曲線を用いて、単一の加熱条件下での性能を確認するものであるが、火災の規模は収納可燃物量や開口および空間の大きさによってさまざまに変化し、性能設計で与えられる加熱強度は一様ではない。そのたびに実大の耐火試験を行うのは費用がかさむため、耐火試験結果の読み替えを行うことができれば有用である。

1.1.2 時事問題からの課題

耐火偽装問題とその対策について

平成 19 年 10 月に発覚した耐火偽装問題は、大臣認定制度の信頼性を大きく損なった。行政では、不正に対する抑止効果と、認定後の性能確保を目的として、既に防耐火関連の大臣認定を受けている構造方法及び建築材料約 15,000 件に対して、年間 1% ずつ程度のサンプル調査の実施を行う等の対策が取られている。我々試験所としては、従来、試験体の製作過程については、特段のチェックを行っていなかったが、試験機関に納入された段階では、確認できない部分があることが今般の不正受験を看過した背景となっていることを踏まえ、試験体製作・管理体制を厳格化に取り組んでいる。

2007年(平成19年)11月2日(金曜日)

東京

東京

東京

東京

耐火偽装何度も実験

水分量念入りに 試験は目視のみ

大手建材メーカー「ニチアス」(東京・港区)による耐火性能の偽装問題で、同社は、2000年に耐火試験が始まった直後から、不正に合格するため、社内研究所で実験を繰り返して、サンプルに含まれる水分量など詳細な条件を設定していたことが、同社の試験を担当した評価機関は、目視のチェックしか行っていないことも判明。国土交通省では、試験の不備もあるとみて、試験方法の見直しの検討を始め、(関連記事10面)

防火建材の耐火性試験は、00年6月の改正建築基準法施行を受け、始まった。と特定していた。耐火用の間仕切り壁は01年2月、軒裏に使用する防火用天井板(不燃板)は同年10月に、それぞれ最初の国交相認定を取得。いずれの試験でも、サンプルに基準を超える水を含ませる不正な手法だったことがすでに判明している。

同社関係者は「試験の合格を急ぐ余り、誤った方向に進んでしまった」と打ち明けた。

一方、同社の防火建材の耐火性試験を担当したのは、指定性能評価機関の財団法人「ペタリーピング」(東京都千代田区)。(東京部千代田区)同機関では加熱試験に先

立ち、同社が提出したサンプルを目視でチェックしただけだった。外観上、見えない部分や、材質に含まれる水分量などは、基準に適合しているかどうか詳細に確認していなかった。

ペタリーピングでは「想定外の事態で、容れ度はなかったと考えている。巧妙な手口で見抜けなかった」としている。

このため、国交省では今後、サンプルの作成過程に評価機関の検査員が立ち会ったり、複数のサンプルの提出を求め、材質をチェックしたりするなど、の対策を検討するとしている。

資料 1-1-1 耐火偽装に関する新聞記事⁽¹⁾

このような認定制度の運用方法や試験体製作・管理の厳格化という、耐火試験前後における対策は、有効ではあるが2次的なものである。最重視すべきは耐火試験そのものの改革であり、まず規制強化の動きから、1仕様1認定の縛りが設けられた。これまでは、試験体の選定時に必要とされるバリエーションの認定・必要試験数の絞込みに当たり、1体ずつの性能確認試験による比較を行って、最も不利なものを選び出していた。このプロセスでさえ、1体ずつの耐火試験は高額であり大きな負担となっていた。それが1体ずつでは繰り返し性が担保されていないという理由で、認定試験時と同等の2体の試験数が求められることになったのである。これはバリエーションの制限や試験数の増加によって申請者に多大な負担を強くことにつながっている。複数の材料からなる構造体について、工学的判断で有利不利が明らかにできれば、試験を省略することが可能になる。

工学的判断が特に望まれるのは以下の項目である。

・厚さについて

湿式工法のように現場施工の場合、厚さの管理は難しく、試験体に用いた厚みから許容誤差をどこまで認めてよいかという場合、またぎりぎりの合格判定の時、余裕を持たせるためにどれくらいの厚みを付加すればよいかという場合、有機物を含む材料で、厚さを増加することで発熱量は増えるが遮熱性は高まると予測される時の優劣を判断するような場合がある。

- ・含水率について

含水率は養生期間や気象条件によって変動し、また管理も難しく、木材など自然素材では個体差も大きいことが知られており、試験体に用いた条件が最も不利なものとは限らない場合、許容誤差をどこまで認めてよいかという場合がある。

- ・加熱面の方向について

区画部材について、加熱面と非加熱面が裏表対称の場合は、加熱面は1方向でよいことになっているが、そうでない場合は両方向からの加熱が必要とされる。また面材が複層している場合、その順番についてどちらを加熱側に持ってきた方が有利か判断したい場合がある。

また耐火偽装問題については、視覚偏重・現物主義の風潮が不正受験を看過した背景として浮かび上がった。これを反省し、合否という結果だけでなく試験結果を精査して、より信頼性の高い評価を行う必要がある。これらの目的を果たすためには、最終的な判断は耐火試験により行うとしても、材料のどの性能が耐火試験結果にどの程度影響を及ぼすのかについての対応関係が示され、耐火性能の目安についてある程度の予測が行える環境を整備する必要がある。そこで本研究では、まずは壁を対象を絞った上で遮熱性に焦点を当てて、区画壁の温度上昇を予測する手法について考えることとする。

1.2 既往研究の整理

1.2.1 温度上昇の数値解析手法についての既往研究

火災時における建築部材の温度上昇の算定方法は、若松孝旺氏や松本衛氏、原田和典氏等による研究がある⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。若松氏はコントロールボリュームの熱収支を離散化して1～3次元の座標について非定常熱伝導問題の数値解を得る手法を示した。その中で数値解の精度を確認するため、熱伝導の微分方程式の理論解と比較している。

熱伝導の理論解を得るには、半無限固体の概念が使われ、例えば初期温度が T_0 であった半無限固体において、 $x=0$ の表面温度が突然 T_s に上昇し維持されるとした場合、

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1.2.1)$$

を次の初期条件および境界条件

$$\left. \begin{aligned} T &= T_0 (t=0, 0 \leq x < \infty) \\ T &= T_s (0 \leq t < \infty, x=0) \\ T &= T_0 (0 \leq t < \infty, x=\infty) \end{aligned} \right\} \quad (1.2.2)$$

の下に解いて得られ、

$$\begin{aligned} \frac{T(x,t)-T_0}{T_s-T_0} &= 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \\ &= \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \end{aligned} \quad (1.2.3)$$

T : 温度(K)

x : 表面からの距離(m)

t : 時間(s)

α : 熱拡散率(m^2/s)

$erf()$: 誤差関数

$erfc()$: 余誤差関数

添え字

(x, t) : ある点のある時間における値

0: 初期値

s : 表面の値

のように与えられている。

理論解は他に、温度 T_∞ の流体から熱伝達を受ける場合、一定の熱流束 q_0'' を受ける場合、一定の熱流束 q_0'' を受けるとともに表面から熱を失う場合については同様に得られており、数値解析の手法をとるのは、これら以外の条件下での温度上昇を求めたいためである。表 1-2-1 に理論的に解ける条件と、耐火試験を念頭に置いたときに求めたい条件を示す。

表 1-2-1 条件設定

	理論的に解ける条件	求めたい条件
①	1次元座標	2, 3次元座標
②	半無限固体	有限の厚さ、複層壁
③	一定加熱、一定熱流束	任意の加熱曲線
④	固体内で発熱・吸熱なし（乾燥壁）	固体内で発熱・吸熱あり（含湿壁）
⑤	材料の熱物性値が温度に対して一定	材料の熱物性値が温度に対して変化

若松氏はこれらの条件について数値解を得る手法を示したわけだが、⑤の材料の熱物性値について予め温度に対して一定であるとして計算した数値解を、後で実験結果に合わせて修正することで、物性値の温度依存性やばらつきを考慮した予測手法を提案している。

松本氏はこの後、④における水分の影響について熱・水分の同時移動を取り扱った数値解析手法を示している。その中で火災時のコンクリート壁について、加熱面近傍から内部へ水蒸気の移動が起これ、水分の再配分が起これることを指摘している。その影響は内部で大きく、水分の移動を考慮せず、100℃においてのみ蒸発するという近似法を用いる場合は、初期含水率として、水分の再配分を考慮した含水率分布を用いる必要性を指摘している。

原田氏は熱・水分の移動モデルを用いて、火災時のコンクリート壁について、さらに詳しく広範囲な検討をおこなっている。まず⑤の高温時の熱物性値について測定方法を示すとともに、数値解析によってコンクリートの骨材の種類や量、養生条件が遮熱性能に与える影響を示している。このように火災時における建築部材の温度上昇の算定方法は、より複雑な現

象を扱えるように、また実験データをより精度よく再現できるように、様々なモデルが追加されてきた。

しかし設計法として、あるいは評価法としての予測手法を考えた場合、モデルの抽象化という逆の方向性が必要になる。2005年10月に発覚した耐震偽装事件では、算定方法の中身に偽装が行われ、算定結果のみで判断することは、誤った判断を下す危険性を孕んでいることを教訓として伝えてくれた。それを補うのは使用した数値解析モデルの基となっている理論に対する理解と、数値解析モデルを個々の事例に適用した際の妥当性の検討であるが、どちらの場合も要点を押さえるのに困難な計算過程の複雑化・長文化は、大きな欠点であり、簡易的記述にすることが必要である。

また数値解析手法の多くは、その物性値の取得に問題があり、本研究で扱う土壁等は文献で示される物性値に幅があるような場合、どの値を用いるかで予測結果に大きな違いを与える可能性がある。

1.2.2 温度上昇の簡易予測手法についての既往研究

耐火性能検証法は、複雑な数値解析を伴わず、合理的な耐火性能の算定法を示している点で大変優れたものである⁽⁶⁾。壁の遮熱性に関する耐火性能検証法での取り扱いは、原田氏等の研究成果をもとに、鉄筋コンクリート構造について詳しく示されている。遮熱性の検討として初期温度+140Kの温度上昇に要する時間の算定方法と、熱劣化深さについての検討で、内部温度が500℃に達する時間の算定方法について示されているので紹介する。

どちらも半無限固体理論をもとにした式1.2.3をスタート点にして、遮熱性については、この式がフーリエ数($F_0 = \alpha t / x$)の関数になっていることから、温度上昇時間 t は厚さ x の二乗に比例すると考え、実験結果より比例定数を算出している。

それに対し500℃に達する時間については、もう少し手を加え、式1.2.3の右辺を指数関数で近似し、かつ表面温度 $T_s - T_0$ を標準加熱曲線 $T_f - T_0$ (式1.2.4)で置き換えた簡易予測式を提案している(式1.2.5)。ここで、指数関数で置き換えたことにより現れる係数 c を、数値解析より求めた温度分布に一致するように求めている。そして $T(x, t) = 500^\circ\text{C}$ となる時刻 t を求めるために、式1.2.5は t について陽に解けないので、実用範囲内で一致するような初等関数で置き換えた近似式を用いている。

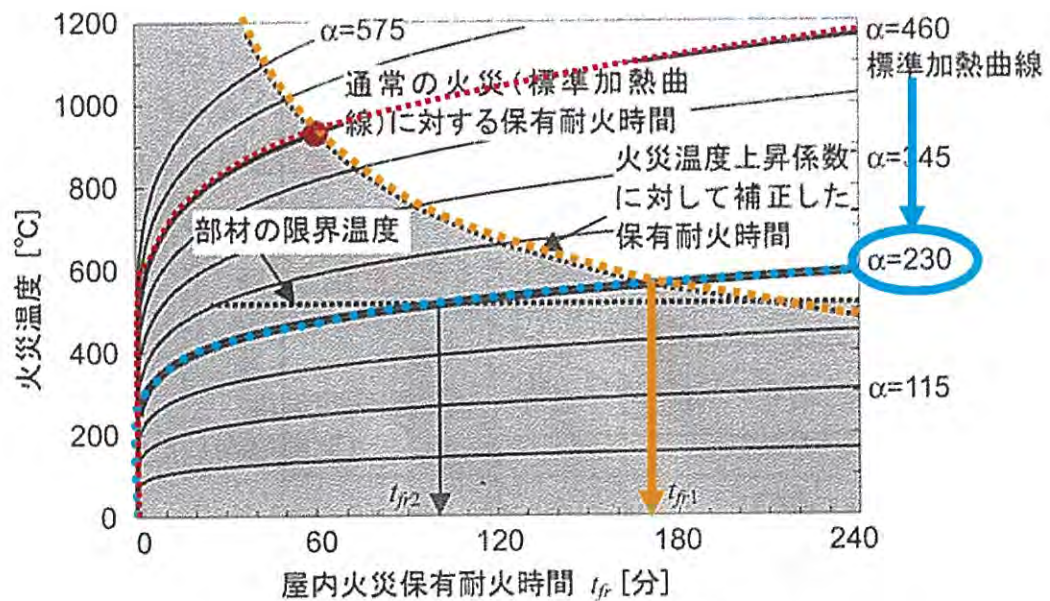
加熱温度曲線⁽¹⁰⁾

$$T_f - T_0 = 345 \log_{10}(8t + 1) \approx 460t^{1/6} \quad (1.2.4)$$

より

$$\frac{T(x, t) - T_0}{460t^{1/6}} = \exp\left(-\frac{cx}{\sqrt{t}}\right) \quad (1.2.5)$$

このように鉄筋コンクリート構造については温度上昇の簡易予測手法が示されているが、実験結果からもしくは数値解からの比例定数を用いているため、その他の材料にあつては、温度上昇を簡易に予測する方法は示されていない。耐火試験の結果を読み替えて、異なる加熱条件下での性能を予測する方法を示すのみである(図1-2-2)。またこれは、実験で求められる耐火時間が終局時の性能ではないことで、安全率の定量化・統一ができていない。本研究では、その他の材料についても温度上昇時間を簡易に予測する手法を提案し、土壁と石膏ボードについては実験結果との比較により、妥当性と適用限界の検討を行う。

図 1-2-1 屋内火災保有耐火時間の算定式⁽¹⁾

また壁の遮熱性能に限らず、建築物のその他の部位における火災時の温度上昇を予測する手法に目を向ければ、鉄骨の耐火被覆による遮熱効果を簡易予測式で表わした Pettersson 氏の研究が挙げられる⁽¹⁸⁾。この中に被覆材に含まれる水分による鋼材の温度上昇の時間遅れを、以下に示す η の値から求める対応表が示されている。(単位系と記号を本論文で用いるものと統一して示す。) このように水分の影響を分けて計算し、後で足し合わせる方法は古くからおこなわれており、本研究でもこの考えを踏襲している。しかし式 1.2.1 は耐火試験で用いられる標準加熱曲線下での遮熱性能の予測に限られており、本研究ではその他の加熱条件下における遮熱性能についても温度上昇を予測する手法を提案するものである。

$$\eta = \frac{\rho}{\lambda} \cdot \phi \cdot x^2 \quad (1.2.6)$$

t_v : 被覆材に含まれる水分による温度上昇の時間遅れ (s)

λ : 熱伝導率 (kW/mK)

ρ : 被覆材の密度 (kg/m^3)

ϕ : 含水率

x : 被覆材の厚み (m)

表 1-2-2 η と t_v の対応表

η [m^3K/kW]	4	8	12	16	20	24	28
t_v [min]	5	15	25	30	40	50	55

その他に、Tsantaridis により木材の炭化速度の予測手法が提案されている⁽²³⁾。これは数値解析手法で問題となる物性値の取得について、熱伝導率や比熱など個々の物性値を得る方法ではなく、コーンカロリメーター試験装置での加熱試験から得た炭化速度をもとに、耐火試験での炭化速度を予測する手法をとっている。コーンカロリメーターのような小型の材料試験であれば、コストも安く済み、また加熱温度や境界条件等も耐火試験に比べて制御しやすいため、再現性の高いデータが得られる利点がある。本研究で示す簡易予測手法は、加熱に応じて厚さが変化していくような材料に対しては適用を考えていないが、耐火試験結果から物性値の推定が行えるように考慮しており、これを用いて性能設計時を念頭に異なる加熱条件下での遮熱性能を予測する手法について提案を行っている。

1.3 研究の目的

本研究では、耐火試験で代表される区画火災に曝される壁の温度上昇を簡易に予測することを目的とする。その対象と用途としては以下のようなものが考えられる。

- ・企業の開発担当者を対象として、防火区画の開発時において、必要とする温度上昇時間を達成するために必要な、壁厚や熱拡散率などの物性値の目安についての示唆が簡易に得られること
- ・防火設計担当者を対象として、厚みや熱拡散率などの物性値が既知の壁について、温度上昇時間の目安を得ることで、仕様規定や大臣認定品でない、いわゆる防火区画と呼ばないような壁の遮熱性能が評価できること
- ・および耐火試験で求めている単一の加熱条件下における遮熱性能を、性能設計を念頭において温度上昇係数が任意の火災に曝される条件下での性能に読み替えること
- ・試験機関や建築主事にとっては、耐火試験での1仕様1認定の縛りに対してバリエーションの認定拡大や必要試験体数の絞り込みを行うため、厚みや熱拡散率などの物性値あるいは加熱面の方向を変えたときの遮熱性能の有利不利について評価できること
- ・および耐火試験時の温度測定データから、不自然な現象を見分けること

これらの対象・用途を念頭に置いた場合、温度上昇にどの要素がどのように影響するかの対応関係が簡潔明瞭な形で記述されることが重要である。よって、数値解析を用いることは適当ではなく、また解は一般性を持つ必要があるため、実験定数で記述することは避けた。そのため本研究では、以下に挙げる事象について近似や適用範囲の制限を行う一方で、数値解析によらずに温度上昇を簡易に予測する手法について提案を行う。

既往研究の整理から、表 1-2-1 に見られるような条件を追加するために、数値解析が行われてきたことを紹介した。数値解析なしで現象を記述するためには、この中で上記の目的のために、いくつか近似を行う必要がある。まず本研究では①の座標系については、厚さに比較して面方向の拡がり十分に大きい壁に限定することで、1次元の非定常熱伝導を取り扱う。また力学的な検討が必要となる非損傷性に対する検討は行わず、遮熱性すなわち温度上昇の予測のみ取り扱う。②の半無限固体理論を前提とするため、非加熱側表面からの失熱の影響について検討を行う。③の加熱条件については、実験値との比較のため、加熱温度が時間とともに変化する加熱条件への適用を行う。④の吸熱・発熱反応については、含水率の影響を確認することが目的の1つであり無視できない。そこで水分の影響を分けて計算し、後で足し合わせる方法をとる。また水分の移動を考慮すると、途端に複雑となり数値解析が必要となる。そこで水分蒸発はある時間にはある1点でのみ起こっているとみなして、水分による影響を計算する。この際、燃焼生成物は瞬時に拡散し、周囲に蓄積することはないとする。松本氏が指摘した水分の再配分を考えないことになるため、その影響を確認する必要がある。⑤の熱物性値の温度依存性については一定であるとの近似を行うこととする。

簡易予測式の妥当性については、実験値との比較のほかに、水分の移動を考慮しない1次元の熱伝導モデルによる数値解との比較を行う。実験については、厚さと含水率を変えた土壁とそれに杉板および石膏ボードで防火改修を施したものと、加熱条件と载荷条件を変えた石膏ボード間仕切り壁について、非加熱側表面温度が遮熱性の制限値である初期温度+180Kの温度上昇に至るまで、加熱実験を行った。

1.4 本論文の構成

図 1-4-1 に本論文の構成を示す。以下に本論文の構成を簡略に記す。

第2章では、研究の目的である簡易予測手法を導くきっかけとなった、標準加熱曲線下における土壁の加熱実験について報告する。実験より得られた主な知見として、水分蒸発の影響とみられる温度停滞時間と土壁の 200℃ 上昇時間は、加熱面からの距離に応じて一定の値を取り、総厚に対する影響は少ないこと。そしてこの温度停滞域は時間が進むにつれて、加熱側から徐々に非加熱側へと推移していくことが挙げられる。

第3章では、実験を踏まえて、解析上は、土壁に含まれる水分の影響を、蒸発が完了する点が徐々に非加熱側へと移行していく、移動境界モデルとして取り扱うことを提案する。このとき、蒸発温度に達する含湿壁と乾燥壁の時間差を蒸発時間と定義すると、水分蒸発後の温度上昇時間は、水分の影響のない乾燥状態における温度上昇と、蒸発時間を足し合わせることで予測できるのではないかという仮説を提案する。この仮説を裏付けるために、乾燥壁の温度上昇簡易予測モデルと水分蒸発簡易予測モデルについて提案を行う。乾燥壁の温度上昇簡易予測モデルについては、半無限固体の表面温度が瞬時に引き上げ保たれる場合に対する熱伝導理論解を用いて、簡易予測式を提案している。また水分蒸発簡易予測モデルについては、移動境界モデルとして、蒸発到達点の動きを予測することで、水分の蒸発時間を求める。これらの簡易予測モデルの検証のため、1次元熱伝導モデルを作成し、妥当性について検証を行う。

第4章では、 $\beta t^{1/6}$ で表わされる加熱条件を用いる、性能設計や耐火試験時における壁体の温度を予測する手法について、加熱一定の条件下における理論を用いるために、時間に応じて変化する加熱温度を一定の等価加熱温度として近似する方法と、これに応じた温度簡易予測式を提案する。また、温度上昇時間を求める簡易予測式は、温度履歴を予測する式に変形することもできるため、標準加熱曲線下における、ある位置 x での乾燥壁の温度履歴を求める簡易予測式を提案する。そして、第2章の実験結果と第3章で示した数値解析モデルを用いて簡易予測式の検証を行う。

また、本研究の最終の目的は壁体の温度上昇を予測することであり、そのためには材料の物性値を得ることが必要になる。そこで水分蒸発前の時間帯を乾燥壁として考え、乾燥壁の温度上昇時間の簡易予測式を用いて、実験の温度測定データから熱拡散率 α を推定する方法を示す。

第5章では、標準加熱曲線下におけるその他の材料の温度履歴について、簡易予測式を適用するため、主要構成材料として石膏ボードを割り出している。そして加熱強度を変化させて行った加熱実験の報告を行う。実験より得られた主な知見は、土壁の際には 100℃ 付近にしか見られなかった温度停滞域が、100℃ 付近と 125℃ 付近で2度見られること、加熱強度を上げることで、温度停滞の時間が短くなっているほか、温度上昇勾配もきつくなることである。

石膏ボードの温度履歴を求めるために、結晶水を等価含水率で表わし、蒸発時間の計算方法について改良を行う。そして石膏ボード単層壁について、加熱強度の異なる加熱条件下における数値解および実験値との比較より妥当性を検証する。

第6章では、内部温度分布に着目してこれまで数値解から推定していた比例定数 D の導出を行い、蒸発時間を精度よく求める方法を示している。また含湿壁の温度を予測する方法として、

乾燥壁と含湿壁が蒸発温度に達するまでの温度上昇時間の差を蒸発時間として、時間軸で足し合わせてきたことに対し、乾燥壁の温度上昇の時間変化から、蒸発により抑制される温度上昇を差し引くことで、含湿壁の温度上昇の時間変化を求める式を提案している。

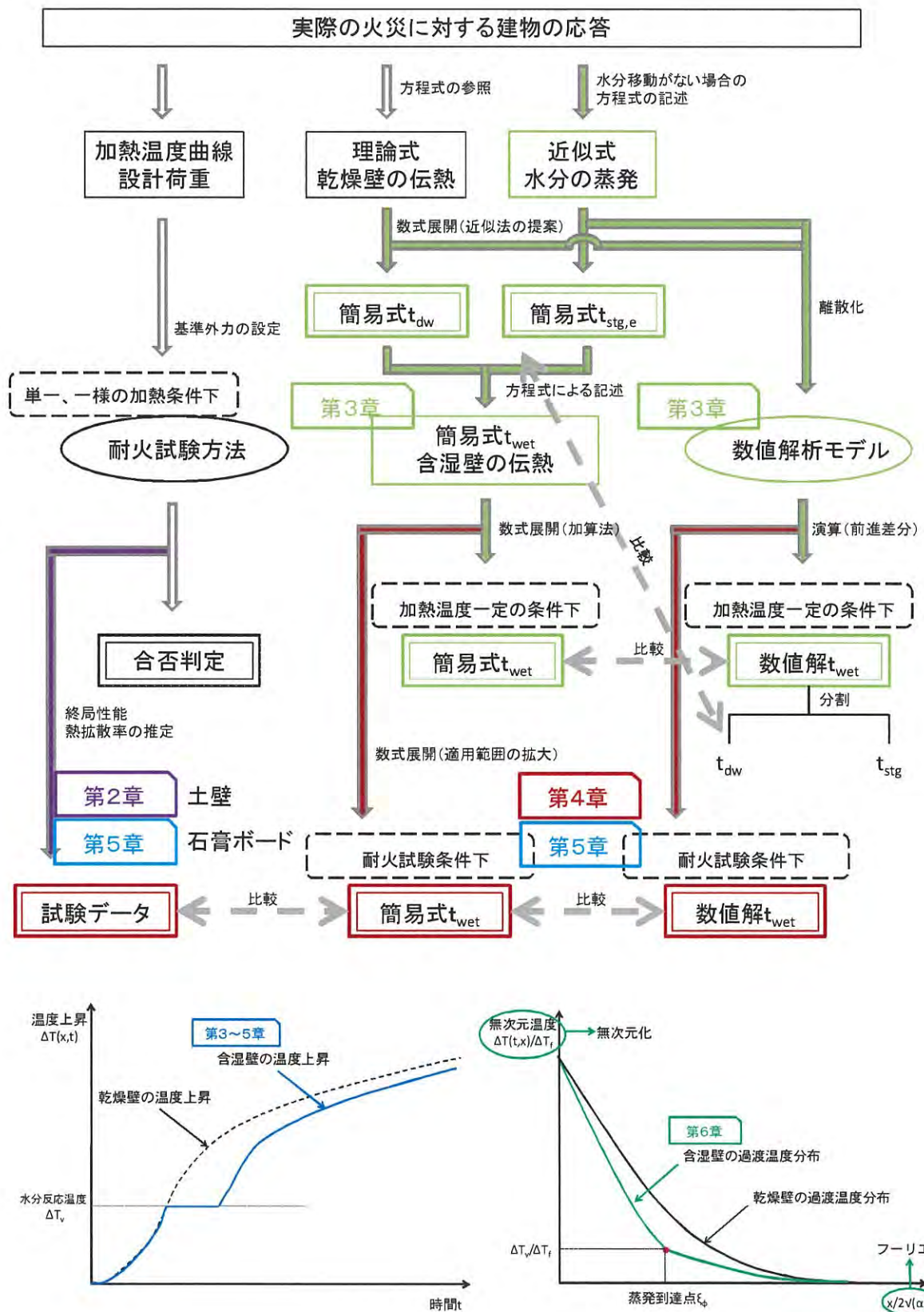


図 1-4-1 本論文のフレームワーク

第2章 標準加熱曲線下における土壁の加熱実験

大臣認定制度は工業化に伴う新建材に対する規制を目的としていたために、既存の伝統技術である土壁や下見板などの耐火性能は十分に評価されていない。より詳しく言えば、地域や施工者によって素材や技術に違いがあり、製品仕様に幅があるものは、一仕様一認定の原則からその都度高額な耐火試験が必要になるが、会社組織の様に認定を取得することが自社の製品に付加価値を与えるような工業製品の場合とは反対に、性能の担保が材料自体ではなく、施工技術を有する職人個人に由来する伝統技術は、積極的に耐火試験による性能評価を受けてこなかった経緯がある。そこで法規制にあまりとらわれずに、土壁の温度上昇時間について評価するために行った標準加熱曲線下における土壁の加熱実験について報告する。

2.1 実験の目的

京都などに見られる軸組木造土壁工法の家屋が連なる町並みは日本特有の風景であり、後世に残すべき公共の財産として保存運動が行われている。しかし真壁工法にて軸組を現しにした木造家屋は火災に対して弱く、特に地震火災を想定すると、阪神淡路大震災で見られたような市街地火災への発展を防ぐための防火対策が必要である。伝統的建造物群保存地区などでは、自主防災組織の結成、住民の防災意識の向上といったソフト面での対策が行なわれてきているが、防災対策をより確実なものにするためには、建物の防火性能、特に隣戸と隣接する壁の性能の向上などハード面の性能向上が基盤として必要だと考えられる。

町並みを活かした既存建物の防火改修方法として、既存壁の防火性能を評価した上で足りない分を補う改修方法が有効だと考える。しかし、既存土壁はその成立年代や地域によって塗り厚が異なり、工業製品のように仕様を限定することが難しく、かといって耐火試験で全ての仕様を評価することは経済的とはいえない。厚みを増やすあるいは被覆材を増やすことで要求耐火性能を満たすことが証明できれば、既存の土壁を活かして防火性能の向上が図れる。このような評価方法は、耐火試験で不合格となった仕様を改良する場合についても役立つといえる。

軸組木造土壁の防火性能は大きく分けて、軸力を負担する木部の非損傷性と面材としての土壁の遮熱性からなると考えられるが、この実験では土壁の土塗り厚と温度上昇時間の関係の把握、および改修方法として杉板又は石膏ボードの張り足した場合の効果に限定して、IS0834 標準加熱曲線下の加熱実験による検討を行なった。

2.2 試験体概要

(1) 試験体の設計

耐火試験の効率化のため、加熱炉に収まる最大試験体サイズ 3150×3150mm を図 2-1-1 のように 1015×1015mm 毎の 9 つに分割し、各々に異なる改修仕様の試験体を設置して 1 度に加熱試験を行った。各試験体の壁部分の平面寸法は 910×910mm、枠材は断面 105mm 角の集成材スギ柱で、厚 25mm のケイ酸カルシウム板で被覆した。

各改修仕様の試験体詳細を表 2-1-1 に示す。試験体仕様は裏返し塗りをした土壁としては最小塗り厚と考えられる 40mm を基準に、下記 3 種類の防火改修仕様を選定した。中塗り土を塗り足して総厚 55mm、70mm としたもの（試験体④～⑥）、厚さ 12mm、18mm、24mm（12mm を重張）の杉板

で片面を覆ったもの(試験体⑦～⑨)、厚さ 9.5mm, 12.5mm, 15mm の石膏ボードで片面を覆ったもの(試験体①～③)。上張材(杉板、石膏ボード)の取り付けは、軸部に取り付けた 30×30×3mm の L アングルを下地として、面材に下穴をあけ四周を 200mm の間隔でビスにて取り付けた。杉板には合いじゃくり(厚さ 12mm)又は本実(厚さ 18mm)加工したものを用い、同様の下地に両端 2 か所で取り付けた。

また、防火改修施工面が非加熱面となる場合(A面加熱)、加熱面となる場合(B面加熱)の違いを把握するため、同一の試験体を2体用意して両方の面から1体ずつ加熱を行った。よって表 2-1-1 に示す裏面温度位置のみ、加熱面を逆にしたときは非加熱側表面に変更している。また、両面对称となる2つの試験体④、⑥については以下のように条件を変化させた※。

※試験体④(B面)土壁 40 厚:2 体目を表面に水が滲むまで (2.1 ㍓/m^2) 霧吹きで含浸させて試験を行った。

※試験体⑥(B面):2 体目は、中塗りに用いる砂を多孔質発泡体のパーライトに変えて片面中塗 15 厚(総土塗厚 55)とした。

表 2-1-1 試験体断面図と温度測定位置(寸法:mm)

基本形	試験体④ 土壁 40 厚		温度測定位置 a---鉛直木舞温度No. 7 b---水平木舞温度No. 8 d---裏面温度No. 54
	試験体⑤ 片面中塗 15 厚 (総土塗厚 55)		温度測定位置 a---鉛直木舞温度No. 9 b---水平木舞温度No. 10 c---荒壁裏面温度No. 25, 26 d---裏面温度No. 55
	試験体⑥ 両面中塗 15 厚 (総土塗厚 70)		温度測定位置 a---鉛直木舞温度No. 11 b---水平木舞温度No. 12 c---荒壁裏面温度No. 27, 28 d---裏面温度No. 56
土壁塗り足し仕様	試験体① 石膏ボード 9.5 厚		温度測定位置 a---鉛直木舞温度No. 1 b---水平木舞温度No. 2 c---荒壁裏面温度(設置忘れ) e---仕上材表面温度No. 37, 38 d---裏面温度No. 51
	試験体② 石膏ボード 12.5 厚		温度測定位置 a---鉛直木舞温度No. 3 b---水平木舞温度No. 4 c---荒壁裏面温度No. 19, 20 e---仕上材表面温度No. 39, 40 d---裏面温度No. 52
	試験体③ 石膏ボード 15.0 厚		温度測定位置 a---鉛直木舞温度No. 5 b---水平木舞温度No. 6 c---荒壁裏面温度No. 21, 22 e---仕上材表面温度No. 41, 42 d---裏面温度No. 53
石膏ボード張り足し仕様	試験体⑦ 杉板 12 厚		温度測定位置 a---鉛直木舞温度No. 13 b---水平木舞温度No. 14 c---荒壁裏面温度No. 29, 30 e---仕上材表面温度No. 43, 44 d---裏面温度No. 57
	試験体⑧ 杉板 18 厚		温度測定位置 a---鉛直木舞温度No. 15 b---水平木舞温度No. 16 c---荒壁裏面温度No. 31, 32 d---裏面温度No. 58 e---仕上材表面温度No. 45, 46
	試験体⑨ 杉板 12 厚×2 枚		温度測定位置 a---鉛直木舞温度No. 17 b---水平木舞温度No. 18 c---荒壁裏面温度No. 33, 34 e---仕上材表面温度No. 47, 48 f---仕上材内部温度No. 49, 50 d---裏面温度No. 59
杉板張り足し仕様			

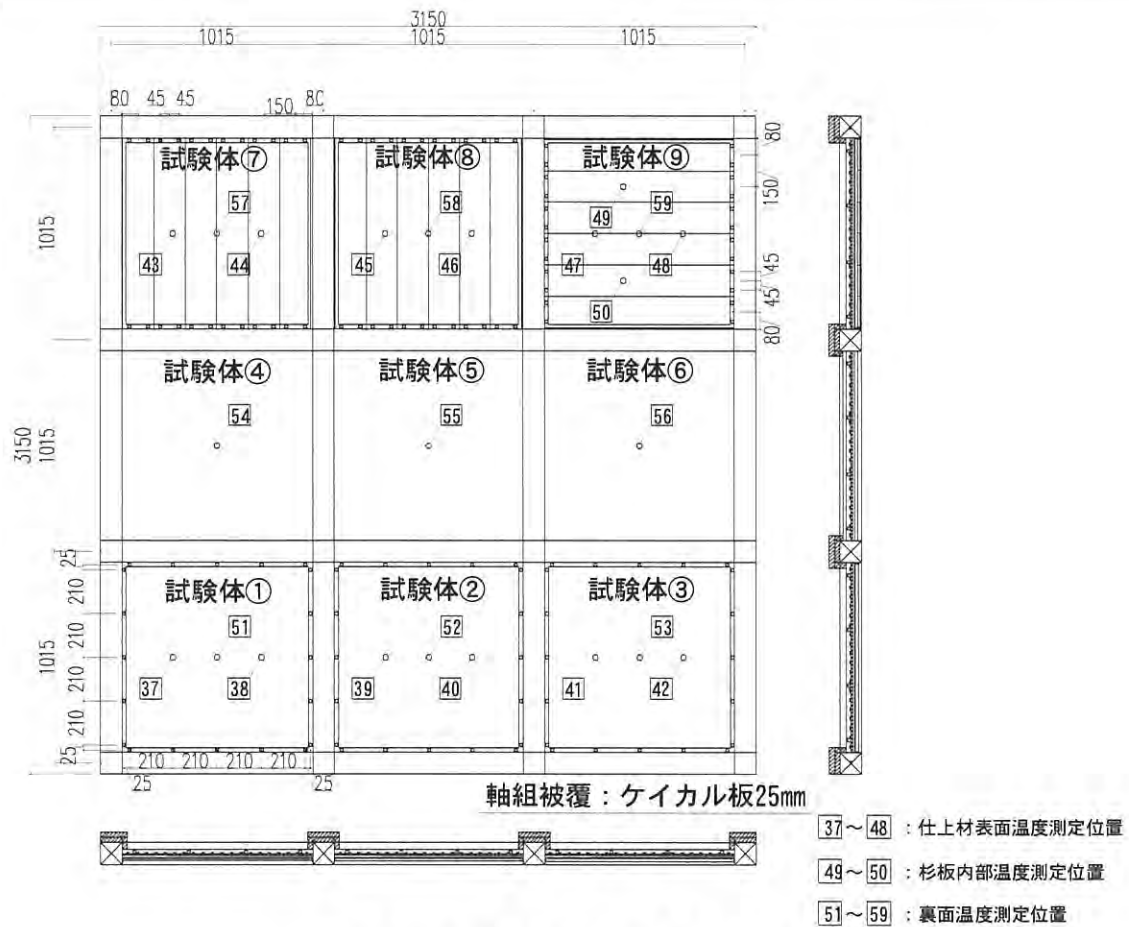


図 2-1-1 試験体構成図・温度測定位置

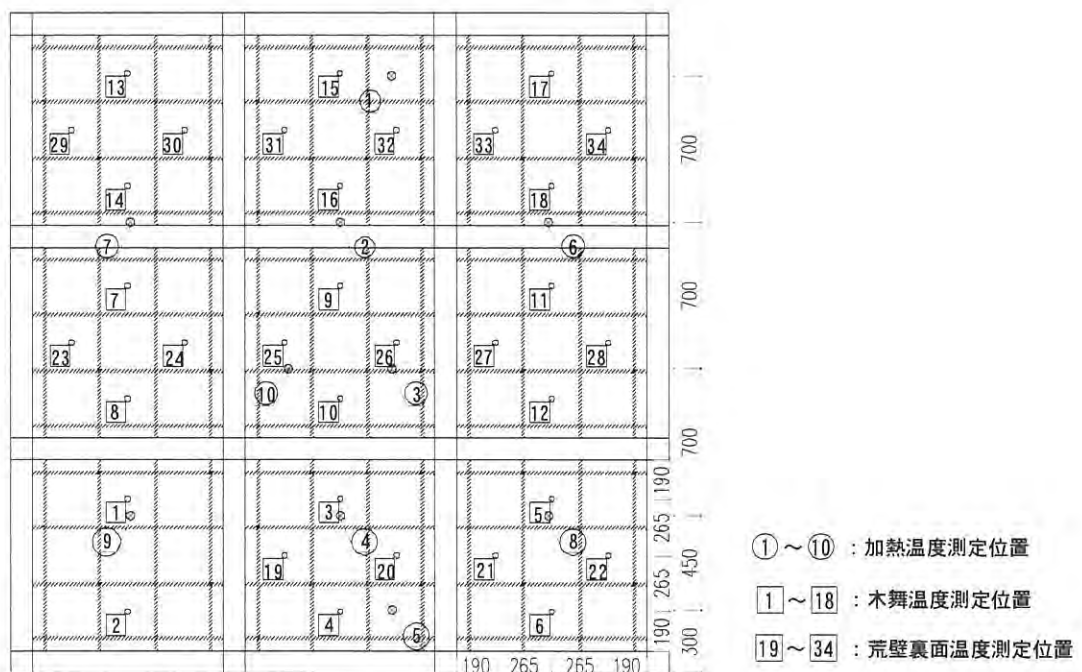


図 2-1-2 試験体図・内部温度測定位置

(2) 試験体の製作及び実験時期

木舞下地は標準的な仕様とし、関東で一般的な荒木田土に、長さ3～5cmの藁スサを混ぜ荒壁土とし、裏返し塗り及び中塗り土は、4.5mmのふるいにかけて、あく抜きをした藁スサと砂を混ぜて使用した。予め軸部の所定の塗り厚の位置に印をつけて厚さを確保した。試験体の製作は2009年3月上旬より開始した。軸組組立→木舞かき→荒壁塗り(3月14日)→むら直し・裏返し塗り(3月24日)→むら直し・中塗り(3月25日)→仕上材取り付けの順に施工し、風通しの良い室内で乾燥養生したのち、5月14, 15日に実験を行った。

湿式工法の要点である養生が適切に行われたか判断するため、各塗り厚ごとに20cm角のサンプルを作成し、試験体と同条件で乾燥養生したのち、105℃又は40℃で5日間恒温恒湿器内で養生して含水率を測定した。測定結果を表2-1-2に示す。

表 2-1-2 含水率一覧

試験体番号		かさ比重 (g/cm ³)	含水率 (%mass)
④	土壁 40mm	1.34 (絶乾)	3.4 (絶乾)
⑤	土壁 55mm	1.38 (絶乾)	4.2 (絶乾)
⑥	土壁 70mm	サンプル作成・管理上の誤りで測定値なし	
①	石膏ボード 9.5mm	0.70 (気乾)	0.4 (気乾)
②	石膏ボード 12.5mm	0.66 (気乾)	0.4 (気乾)
③	石膏ボード 15.0mm	0.79 (気乾)	0.4 (気乾)
⑦⑨	杉板 12mm	0.35 (絶乾)	15.5 (絶乾)
⑧	杉板 18mm	0.34 (絶乾)	15.5 (絶乾)
養生方法	絶乾：試験体と同条件で乾燥養生したのち、105℃で5日間安置して測定		
	気乾：試験体と同条件で乾燥養生したのち、40℃で5日間安置して測定		

2.3 実験方法

IS0834に規定する標準加熱曲線に準拠した加熱を行った。内部の温度は、表2-1-1、図2-1-2に示すように試験体各面を断面方向に区切って設置したφ0.68mmのK-Type熱電対により、30秒間隔で測定した。なお土壁に埋め込んでおいた熱電対は、鏝塗りの際にずれてしまう恐れがあったため、仕上材張付時に、荒壁裏面温度に相当する、仕上材表面温度を追加した(図2-1-1)。

9つ全ての仕様について、裏面温度が初期温度+180Kに達する時間まで加熱を続けた。そのため遮熱性の劣る仕様において、着炎または赤熱が見られた際には、実験が進行できるようケイ酸カルシウム板により当該仕様に蓋をすることとした。また、杉板を用いた仕様⑦⑧⑨は上部に置き、着炎により他の仕様に影響が出ないよう考慮した。

2.4 実験結果(温度測定履歴)

各試験体の温度測定結果を図2-1-3～図2-1-5(A面加熱)、図2-1-6～図2-1-8(B面加熱)に示す。荒壁裏面(表面)温度ならびに仕上材表面(裏面)温度は、同一平面上に2点の熱電対を配している。杉板を裏面側に張り足した仕様(図2-1-5(a)～(c))および石膏ボードを裏面側に張り足した仕様(図2-1-4(a))については、加熱途中において着炎または赤熱が見られたため、ケイ酸カルシウム板にて蓋を行い、その時間までの温度履歴を示す。

2.4.1 A面加熱

(1) 土壁塗り足し仕様

図 2-1-3 (a) ~ (c) は土壁の温度上昇状況である。100℃ 付近で土壁内の水分蒸発による温度停滞が見られる。しかし加熱面から 14mm の位置では停滞が見られない。加熱面に近いことで瞬時に蒸発してしまう可能性も考えられるが、既往のコンクリートを使った実験でも同様の現象が確認されており⁽⁴⁾、松本氏は水分移動を考慮した数値解析の結果から、加熱中においても水分の移動による含水率の再配分が行われている可能性を示唆している。図 2-1-6 (a) の試験体は、試験直前に加熱側表面より霧吹きで水をしみこませ、水分が表面ににじまない程度に含水率を 2 倍に引き上げたものである。この試験体では、加熱側から 14mm の位置においても温度停滞が観測されることから、試験体製作後の養生中に、乾燥が進みやすい材端と内部では、一様ではない含水率分布となっていた可能性も高い。表 2-1-2 に示した試験体サンプルの含水率測定では、全体に対する含水率しか得ていなかった。

加熱面から 14mm と 26mm の熱電対は、竹木舞の表面に這わせている。ここは下地層であり竹木舞に土を喰い込ませようと、鋸に力を入れて塗りつけるため、位置が多少ずれている可能性がある。それに対し、40mm や 55mm、70mm の熱電対は塗り継面や仕上げ面に当たり、位置に対する信頼性は高い。この加熱面から 40mm や 55mm の位置で比較すると、停滞時間は主として加熱面からの距離に応じて変化しており、距離が同じなら土壁の総厚による影響は小さい。その停滞している間隔は加熱側に近いほど短く、非加熱側に向かうほど長くなる傾向にある。そしてこの温度停滞域は時間が進むにつれて、加熱側から徐々に非加熱側へと推移していく。

温度停滞前後の温度上昇速度はほとんど変わらないように思われる。これについては前述のコンクリート壁の数値解析を扱った論文で松本氏も指摘している。また加熱面から 40mm と 55mm の位置で図 2-1-3 (a) ~ (c) の温度履歴を比較すると、300℃ に到達するまでは総厚による影響が小さいが、その後裏面温度に当たるものは、内部に位置しているものに比べて温度上昇速度が小さくなる傾向にある。これは、裏面からの失熱によるものと考えられる。

図 2-1-3 (a) の裏面温度に着目すると、温度停滞終了後、耐火試験における遮熱性の判定値（初期温度+180K）を超え、ほぼ定常状態といえる 100 分時点で約 350℃ に達する。この時点においてもひび割れや亀裂は見られず、面材として安定した遮熱性能を発揮している。試験後の断面から、加熱面側がセラミック質に変化していることが観察され（写真 2-1-1）、この変化が亀裂の防止につながっていると考えられる。

写真 2-1-1 加熱後の土壁断面(試験体 A-④)



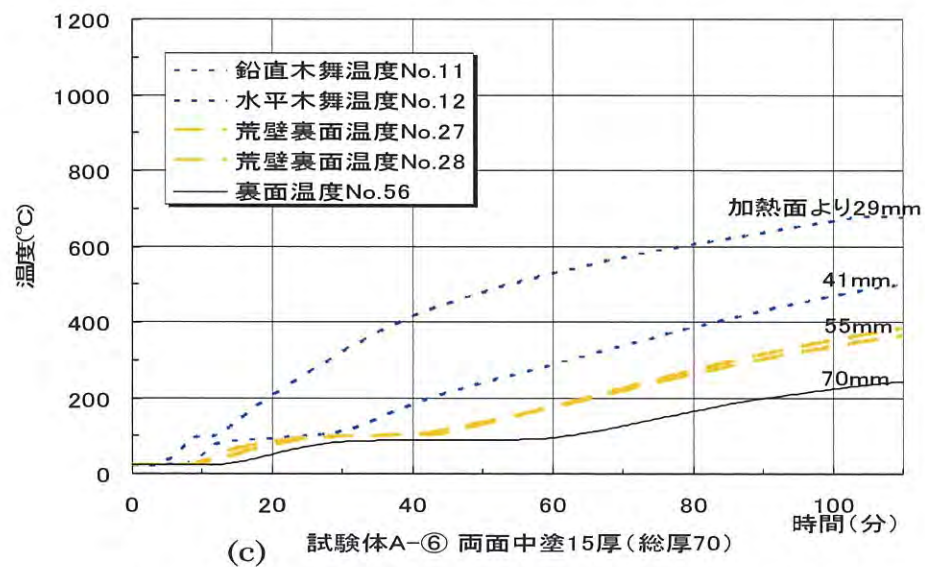
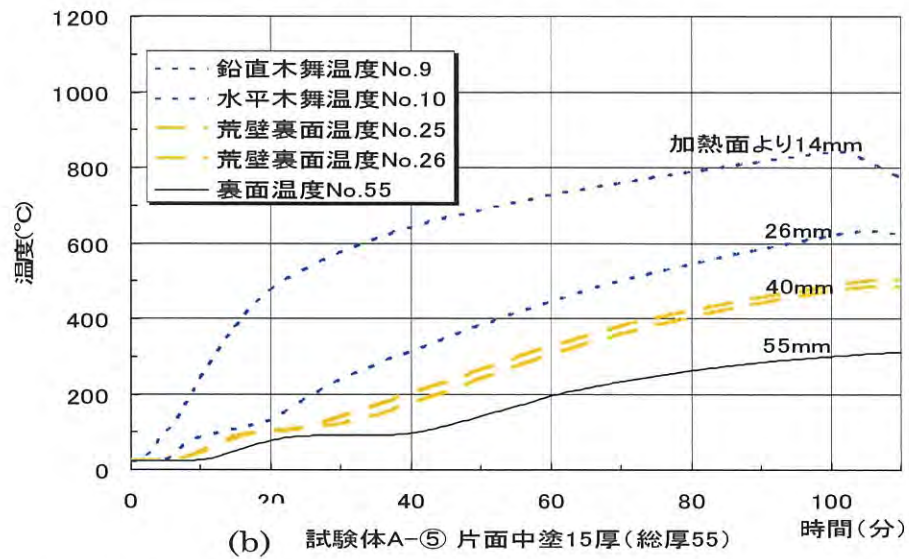
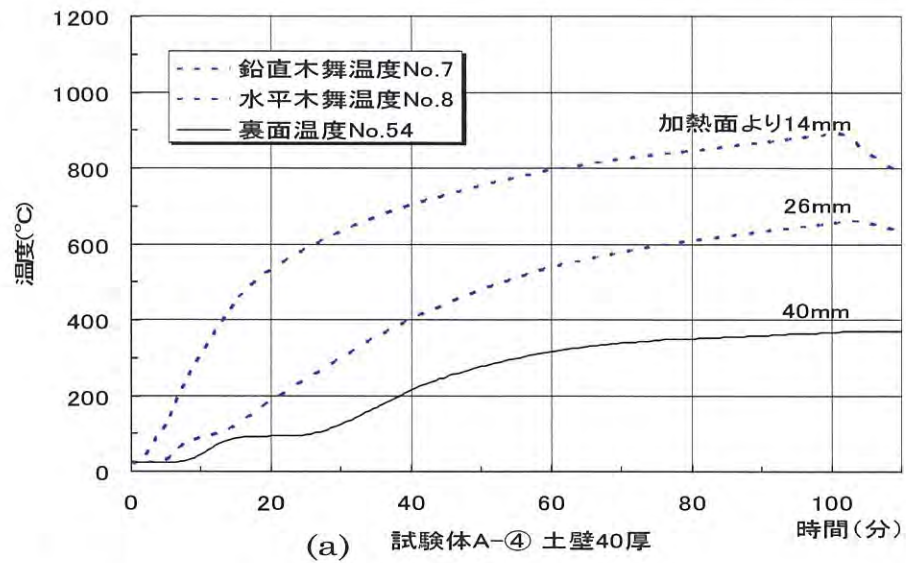


図 2-1-3 温度測定結果(土壁非加熱側塗り足し・A 面加熱)

(2) 石膏ボード張り足し仕様

図 2-1-4 (a) については、非加熱側で赤熱が見られたため、90 分時点で非加熱側から蓋をして塞いでいるため、温度測定データが途中で切れている。また図 2-1-4 (a) については、加熱側から 40mm に当たる荒壁裏面温度のデータが、設置忘れにより欠落している。

土壁塗り足し仕様の考察で、停滞時間およびその後の温度履歴は、主として加熱面からの距離に応じて変化しており、距離が同じなら土壁の総厚による影響は小さいことを示した。図 2-1-4 (a) ～ (c) を比較しても同様なことがいえる。しかし図 2-1-3 と図 2-1-4 の土壁部分を比較してみると、石膏ボードを張り足し仕様の方が停滞時間は短くなっており、停滞後の温度上昇速度もわずかに大きくなっているのが分かる。加えて、加熱側から 14mm と 26mm の温度差はそれほど変化していないが、26mm と 40mm の温度差は、土壁のみの場合に比べて狭まっているのが分かる。それに比べて土壁の裏面温度と石膏ボードの表面温度は、受材である鋼材の厚み 3mm しか離れていないにも関わらず、大きな温度差を示しており、この 3mm の空気層が断熱材の役割を果たし、裏側から土壁部分の温度上昇を促進していると考えられる。

石膏ボードは内部に結晶水を持つことが知られている。図 2-1-4 (a) ～ (c) の裏面温度に注目すると、土壁の場合と同様に水分の蒸発とみられる停滞時間が見られる。異なるのは土壁の停滞温度が 100℃ で固定されていたのに対し、石膏ボードの場合は 100℃ で温度停滞が始まり、緩やかに 130℃ 付近まで上昇する。前半の 100℃ の停滞域が加熱側に配された土壁によるものである可能性も考えられるが、石膏ボードに含まれる結晶水の分解反応が 2 段階で起こるとする報告もある⁽⁸⁾。いずれにしても石膏ボードを裏側に張り足す仕様は、他の仕様に比べて厚さに対する効果が最も高くなっている。

また土壁においては、温度停滞前後の温度上昇速度はほとんど変わらないように思われたが、石膏ボードについては、温度停滞前後で温度上昇速度に明らかな違いがみられた。土壁を挟んで非加熱側に位置することから、入射熱の違いによる影響も考えられ、石膏ボードを加熱側に配した B 面加熱の考察で再度確認したい。

(3) 杉板張り足し仕様

図 2-1-5 (a) ～ (c) を図 2-1-3 (a) と比較すると、杉板の張り足しにより 70～85 分の間、裏面温度を低く抑えており大きな効果が見られる。しかし、その後非加熱側の杉板に着炎したため、非加熱側から蓋をして塞いでいる。燃え出すまでの時間は、杉板の厚さに応じて延びていることが分かる。

石膏ボードと同じく、土壁のみの場合と比べて停滞時間は短くなっており、停滞後の温度上昇速度もわずかに大きくなっている。加熱側から 43mm に位置する仕上げ材表面温度までの温度履歴が石膏ボードと杉板でほとんど変わらないことから、やはり空気層の断熱の影響が大きいと考える。

杉板の裏面温度に着目すると、土壁や石膏ボードの場合は温度停滞がはっきりしていたのに比べ、杉板の場合は温度が常時緩やかに上昇しており、水分の蒸発の影響であるか判断がつかない。

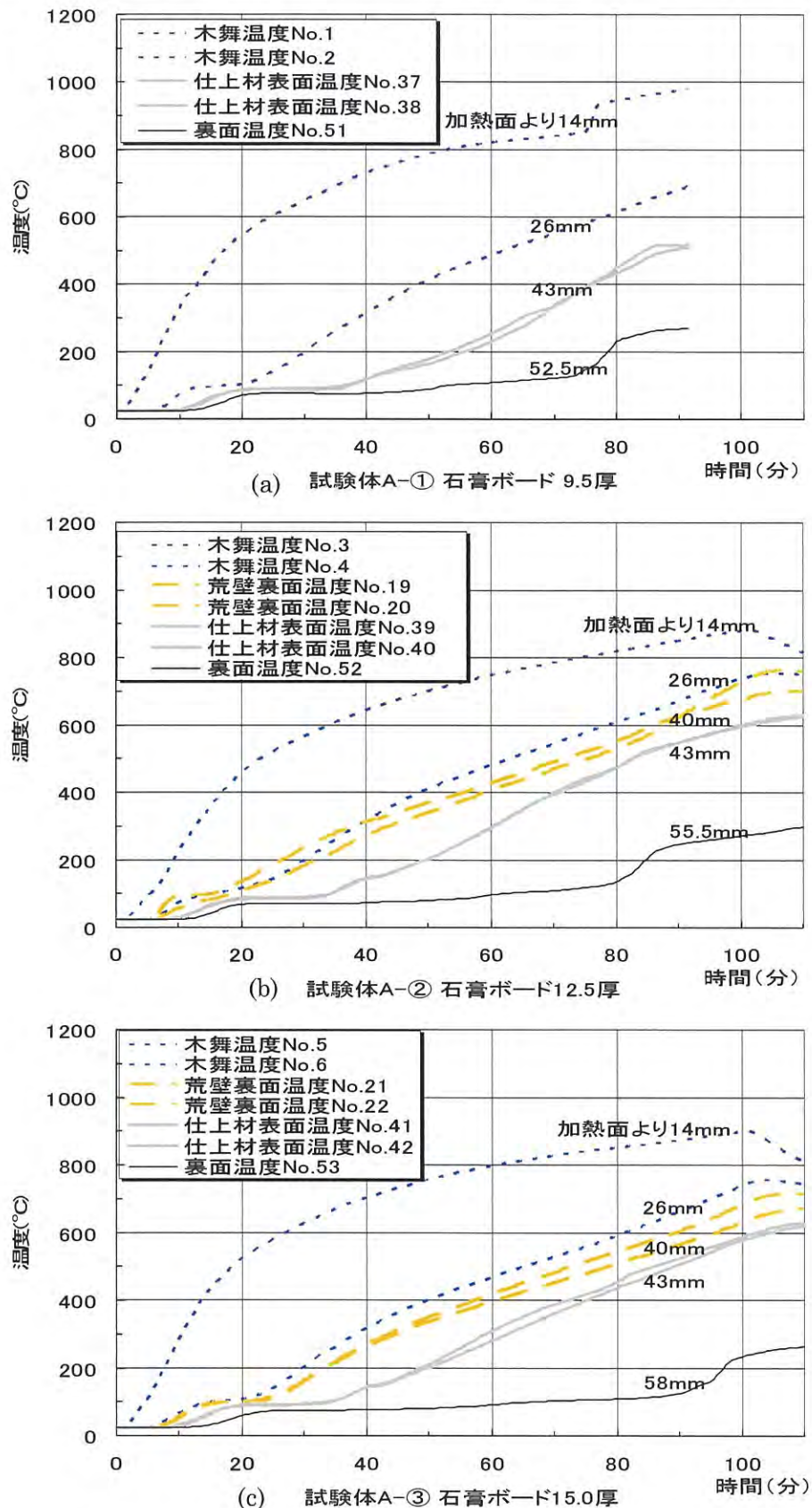


図 2-1-4 温度測定結果(石膏ボード非加熱側張り足し・A 面加熱)

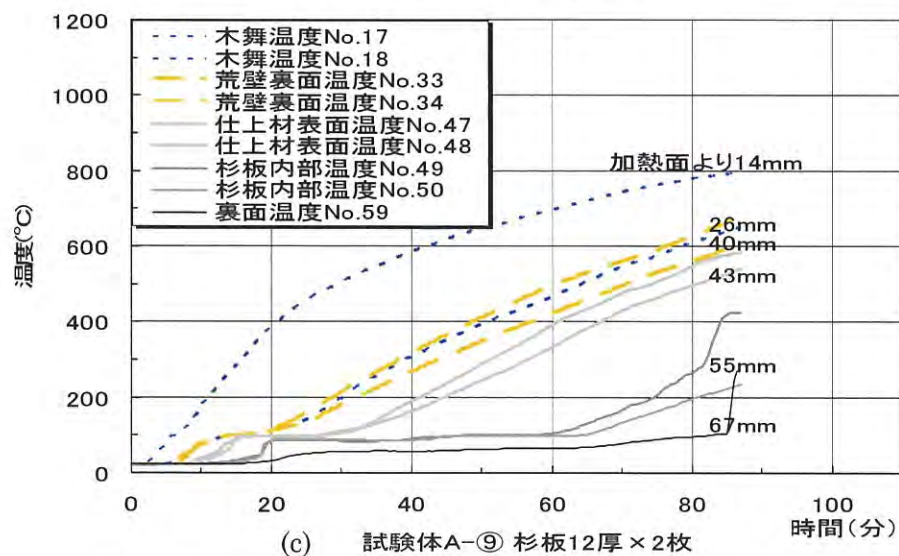
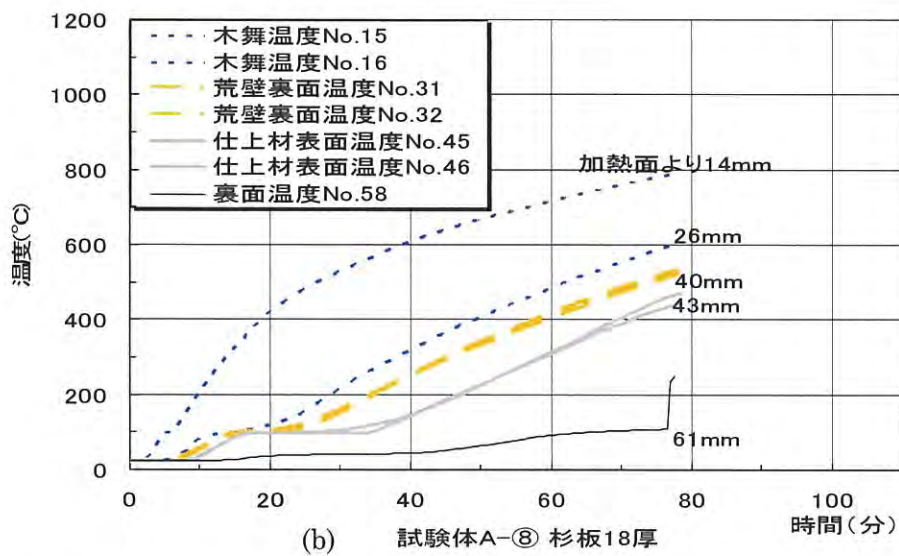
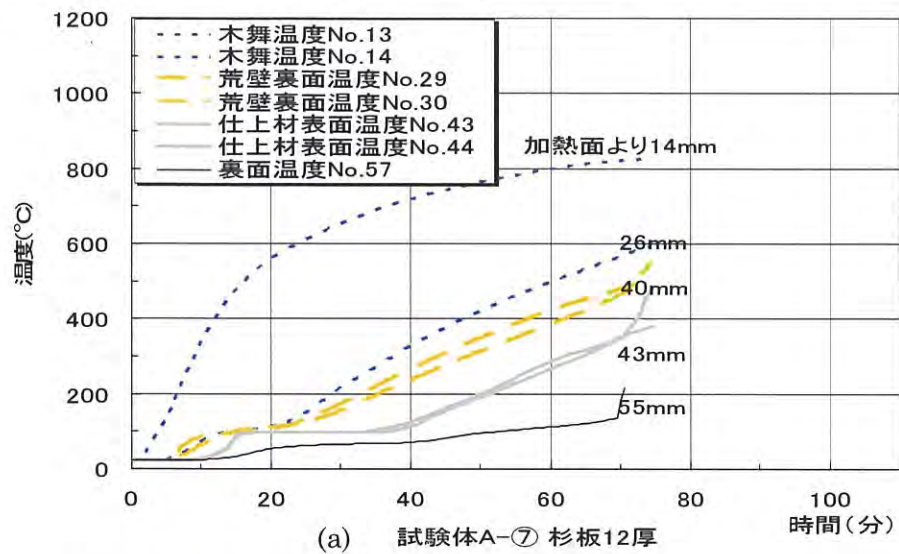


図 2-1-5 温度測定結果(杉板非加熱側張り足し・A 面加熱)

2.4.2 B 面加熱

(1) 土壁塗り足し仕様

図 2-1-6 (a) ～ (c) は B 面加熱を行った土壁の温度状況である。図 2-1-3 (b) と図 2-1-6 (b) は、塗り足しを加熱側に行ったか非加熱側に行ったかの違いで、内部の竹木舞位置の違いと考えてよい。データ数が限られているが、今回の実験では竹木舞位置が加熱側に近い方が温度上昇時間は大きくなった。また図 2-1-6 (c) は、空隙の多いパーライトを骨材に用いることで温度上昇時間の向上を期待したが、若干温度停留時間が延びる程度で大差は無かった。一方で含水率を変化させた図 2-1-6 (a) は停留時間に大幅な向上が見られた。同じ塗厚となる図 2-1-3 (a) と比較することで含水率の影響を見ることができ、含水率を 2 倍にしたことで、温度停留時間が延びており、温度停留は間違いなく水分の蒸発による影響を示していることが分かる。吸放湿性を有する土壁は環境条件によって遮熱性能に違いがあるのであるといえる。

(2) 石膏ボード張り足し仕様

図 2-1-7 (a) ～ (c) は B 面加熱を行った石膏ボード張り足し仕様の温度状況である。土壁を加熱した際にみられた温度停留が、石膏ボード裏面位置で測定した温度測定結果でも観察され、その加熱面の距離に対する間隔は土壁に比べて大きく、石膏ボードに含まれる結晶水の蒸発潜熱の影響が大きいことがわかる。石膏ボード裏面位置が温度停留を示す温度は、今回の実験の場合 100～125℃ 付近であった。

図 2-1-7 (a) において、石膏ボード裏面温度を示す 2 点の温度測定結果にばらつきが見られ、亀裂や脱落の影響で平面内に温度分布が生じていると考えられる。試験体取り出し後の加熱面の状況を写真 2-1-2 に示す。写真より試験体 B-② および ③ については、亀裂は見られるが脱落には至っておらず、温度測定結果からも石膏ボード裏面温度、土壁の内部温度ともに温度上昇は緩やかに推移している。それに対し試験体 B-① については、試験体取り出し後の写真では全面に渡り脱落が生じており、石膏ボード裏面温度に加えて、土壁の内部温度においても 70 分付近で温度上昇速度の変化が生じている。

これらの考察から、石膏ボードは内部に含まれる結晶水の蒸発潜熱によって、温度上昇が抑制されるとともに、蒸発後も、今回の実験で用いたサイズ・留付間隔では厚さが大きいと面材として残り、試験体内部への熱の流入を防いでいることがわかる。

写真 2-1-2 試験体取出し後の加熱面の状況

B-① 石膏ボード 9.5 厚	B-② 石膏ボード 12.5 厚	B-③ 石膏ボード 15.0 厚
		

(3) 杉板張り足し仕様

杉板を加熱側に張り足した場合は、図 2-1-8 (a) ～ (c) に見られるように、杉板裏面温度は目立った温度停留は見られずに上昇し、杉板の燃え抜けによると思われる急激な温度上昇が

約 300℃でみられた。それに続くようにして土壁の内部温度にも温度上昇速度の変化が生じているため、無機質で構成されている石膏ボードのように試験終了時まで遮熱性に寄与することはない。しかし土壁のみの場合に比較すれば、裏面温度の上昇は概ね燃え抜けにかかる時間分抑えられており、従って杉板を燃え代として扱うことができると考えられる。また加熱側に張り足した 24mm 厚のものが、18mm 厚のものより温度上昇時間が短くなる結果となった。これは 12mm を 2 枚重ねて 24mm とした場合の温度上昇時間であり、1 枚の場合の温度上昇時間はより高い効果が期待できると考えられる。

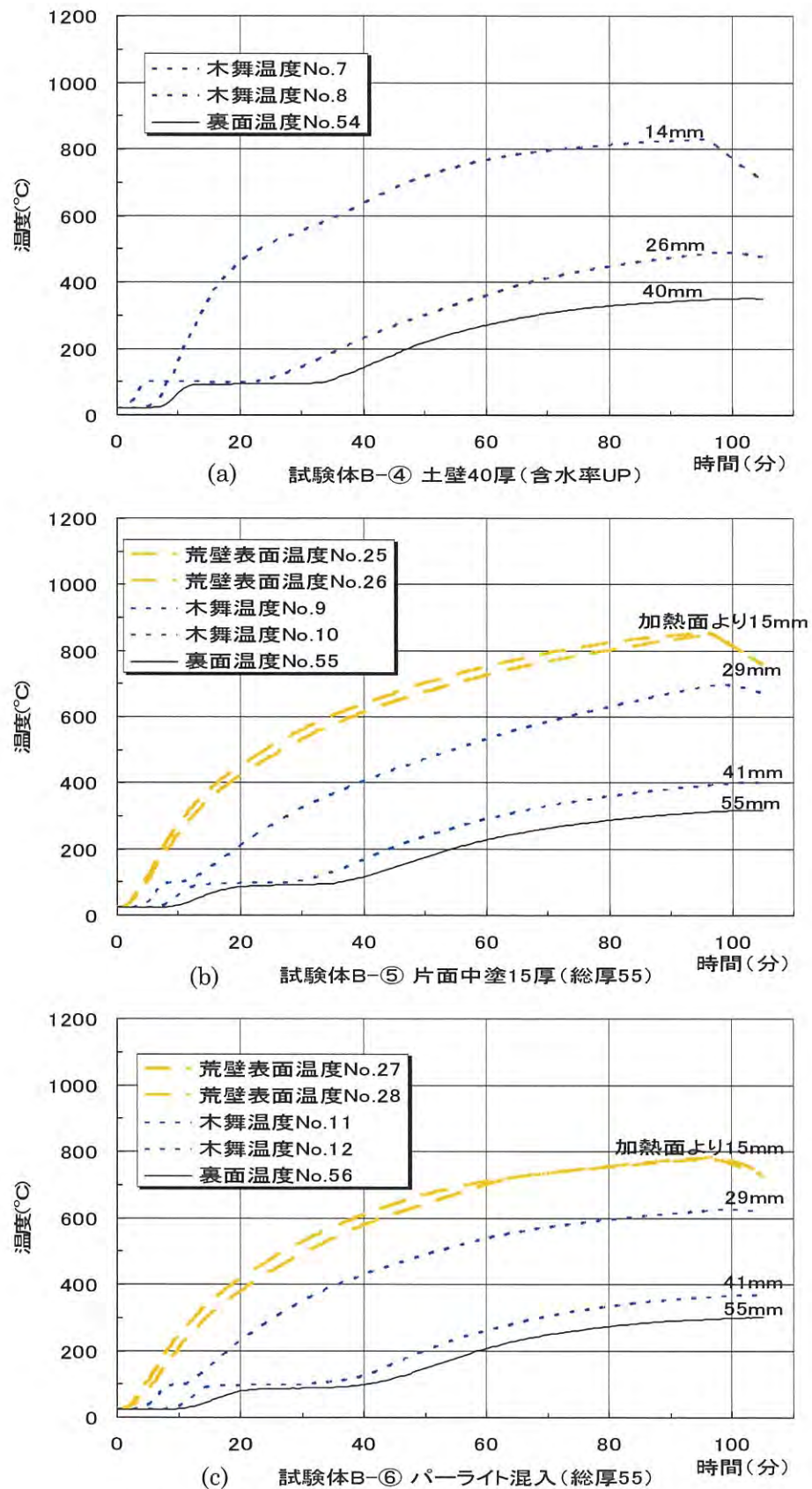


図 2-1-6 温度測定結果(土壁加熱側塗り足し・B 面加熱)

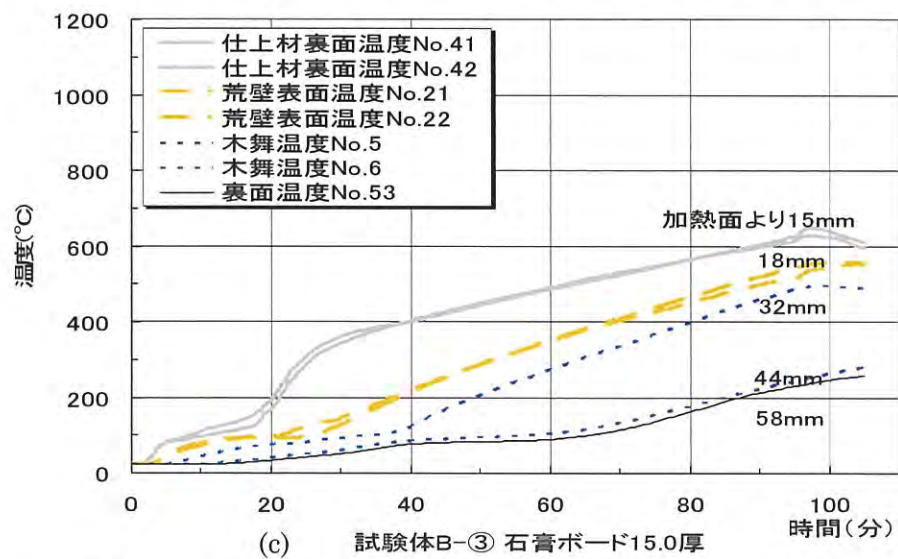
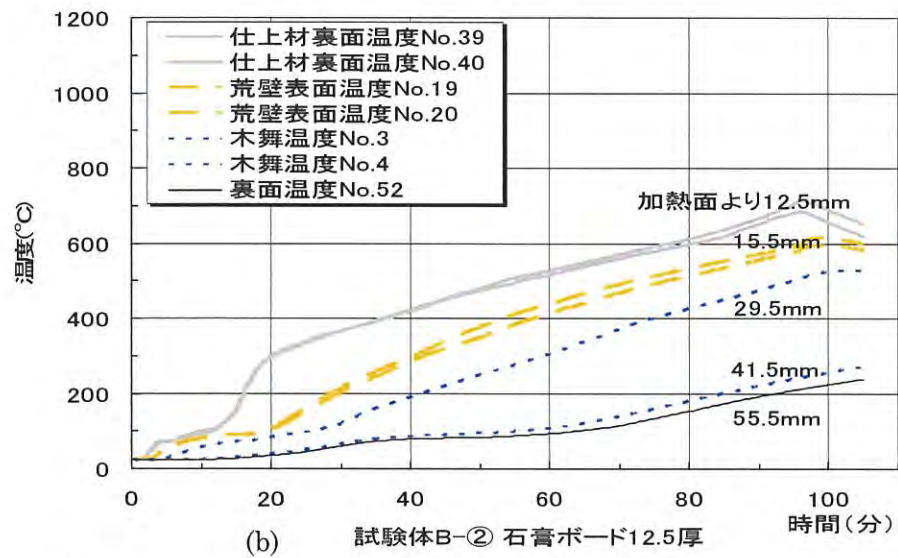
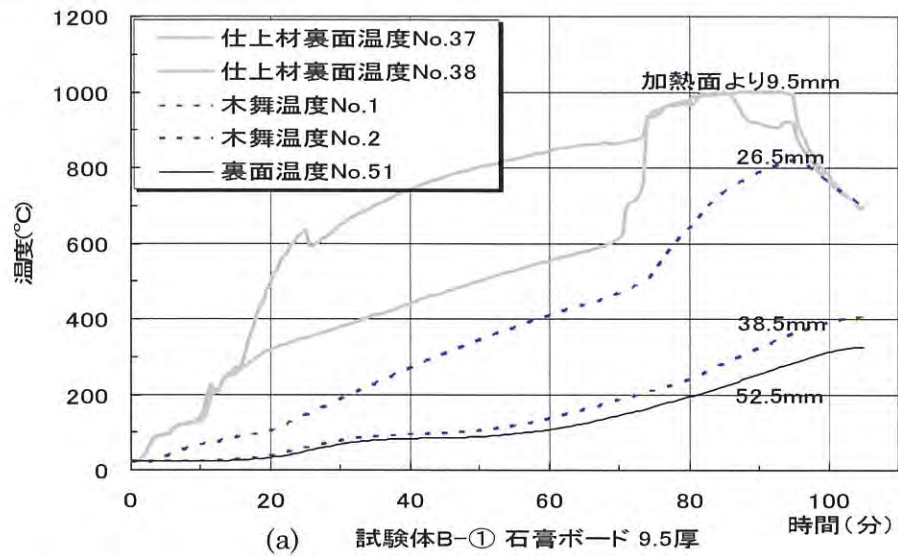


図 2-1-7 温度測定結果(石膏ボード加熱側張り足し・B 面加熱)

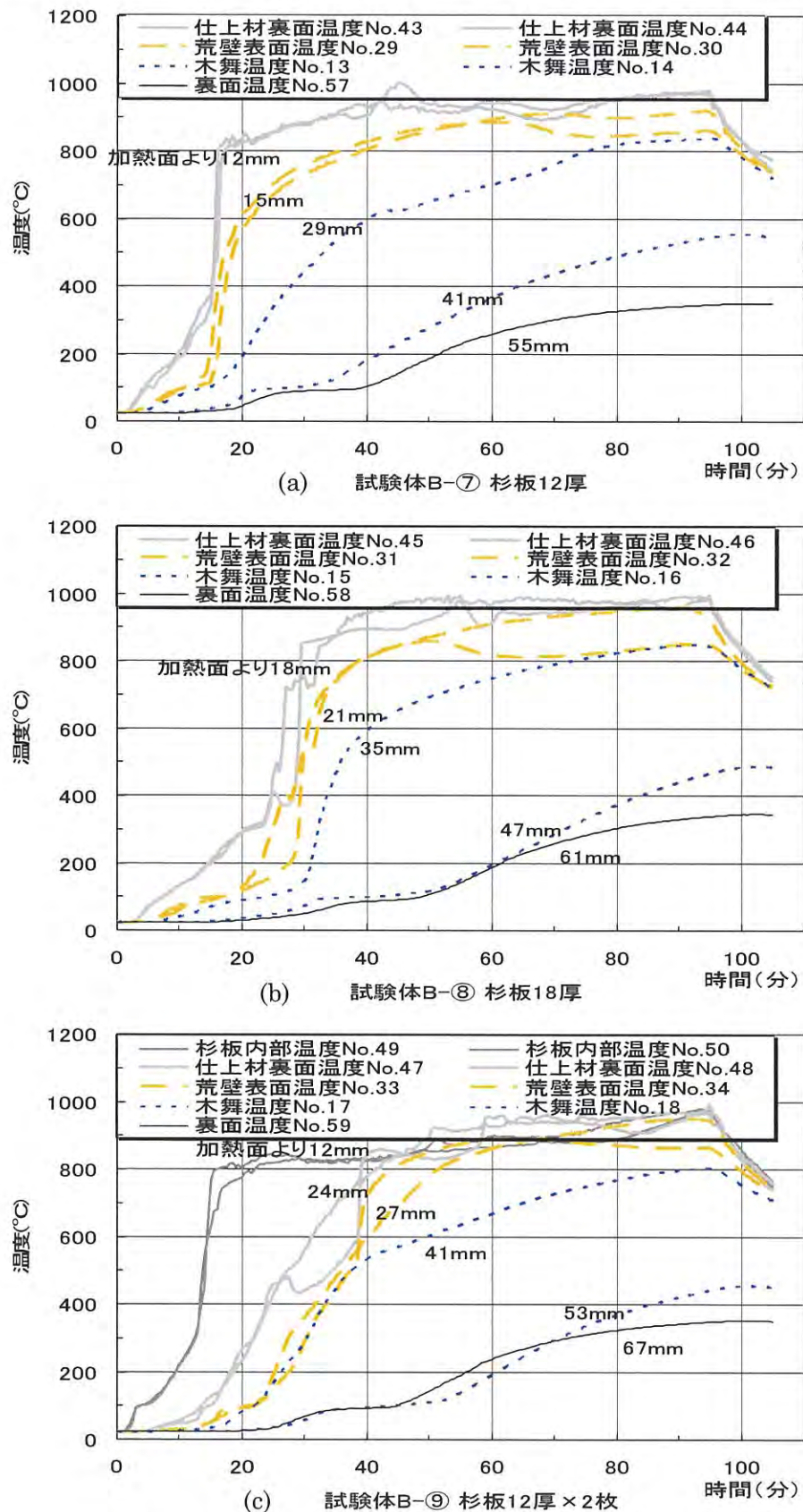


図 2-1-8 温度測定結果(杉板加熱側張り足し・B 面加熱)

2.5 実験結果(内部温度分布)

各試験体の内部温度分布を図 2-1-9～図 2-1-11 (A 面加熱)、図 2-1-12～図 2-1-14 (B 面加熱) に示す。横軸を加熱面からの距離、縦軸を温度とする。加熱開始後 40 分までを 10 分刻み、その後を 20 分刻みとし(途中で計測を終了したものは、その前まで)、同時刻における内部温度を線で結んだ。温度測定位置については、図 2-1-1, 2-1-2 および表 2-1-1 を参照のこと。ただし 0mm の温度データは炉内温度とし、同一断面内に熱電対を 2 点配置したものは平均温度とした。石膏ボードと杉板の張り足し仕様では、下地受け材の厚みによるクリアランス (3mm) の前後で温度勾配が見られ、空気層の影響が見て取れる。

(1) 土壁塗り足し仕様

図 2-1-9 (a) ～ (c) より、加熱温度は一定ではないが、加熱終了前の 100 分時および 90 分時においては、土壁内部は定常状態にあると考えてよい。にもかかわらず、木舞の裏側に配置した熱電対は温度勾配から外れている(図中において白抜きで示す)。木舞層の温度勾配が他の部分に比較して大きくなっており、この部分の熱伝導率が土の部分に比較して小さいことが伺える。また含水率をアップさせた図 2-1-12 (a) と同じ土塗り厚の標準仕様である図 2-1-9 (a) を比較すると、加熱面からの距離が大きい位置あるいは加熱開始からの時刻が早い段階では温度差が 150℃ 程度と違いが大きい、加熱面からの距離が小さい位置あるいは加熱開始から時間が経つにつれて、その差は小さくなる傾向にあることがわかった。

(2) 石膏ボード張り足し仕様

図 2-1-10 (a) ～ (c) より、石膏ボードを非加熱側に張り足した仕様では、土壁内部と石膏ボード内部で温度勾配が異なることが見て取れる。また裏面温度の上昇は抑えられるが、石膏ボードが断熱壁に近い働きをする分、試験体内部に蓄熱され、土壁内部の温度上昇は土壁のみの場合と比べ高くなる。反対に石膏ボードを加熱側に張り足した場合は、図 2-1-13 (b)、(c) に見られるように、熱の流入を表面で防ぐことができるため、試験体内部の温度上昇も抑えられ、持続的な遮熱性能が得られる。また木舞の層も温度勾配が大きく、断熱層的な働きをしていると考えられる。この時の土壁部分は加熱側で温度が高いが、裏面側ではかなりの温度低下がある。図 2-1-13 (a) は 80 分以降石膏ボードが脱落したと見られ(写真 2-1-1)、土壁の表面温度が急激に上昇している。

(3) 杉板張り足し仕様

杉板の場合も非加熱側に張り足した仕様では、試験体内部に 2 種類の温度勾配が見て取れ、また裏面温度の上昇は抑えられるが、試験体内部に蓄熱され、土壁内部の温度上昇は土壁のみの場合と比べ高くなる傾向が見られた。杉板を加熱側に張り足した場合、杉板裏面温度が加熱温度に近い温度まで上昇しており、杉板の焼失が見て取れる。そのため 90 分時の内部温度分布は土壁表面を 0 とみなすと、図 2-1-10 (a) に示す土壁 40mm の場合と同じ状態となっていることが分かる。このことから杉板を加熱側に張り足す場合は、燃え抜けにかかる時間分、温度上昇を抑える燃え代として扱うことが妥当だといえる。

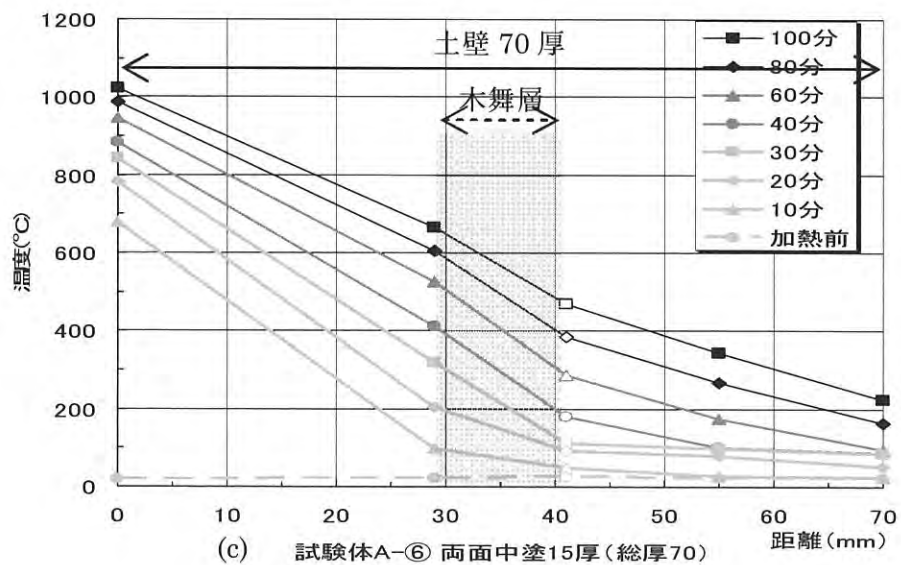
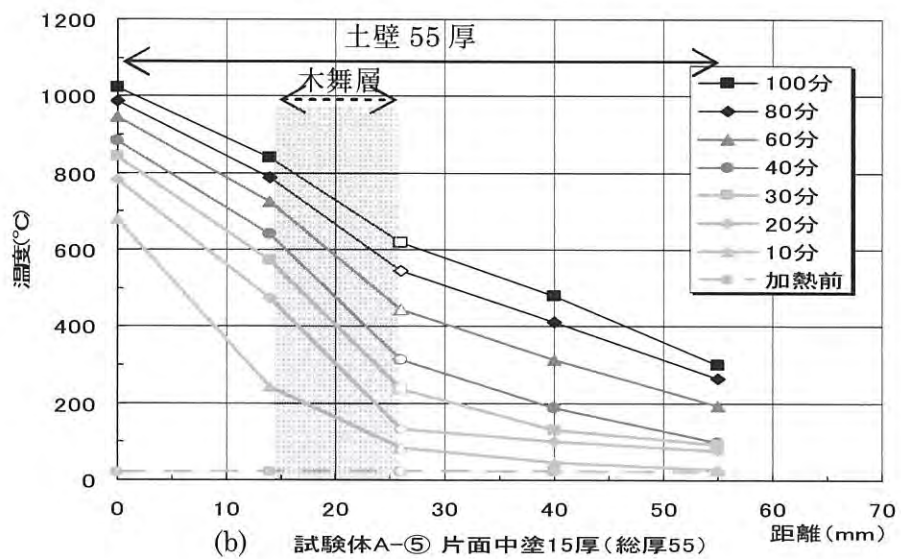
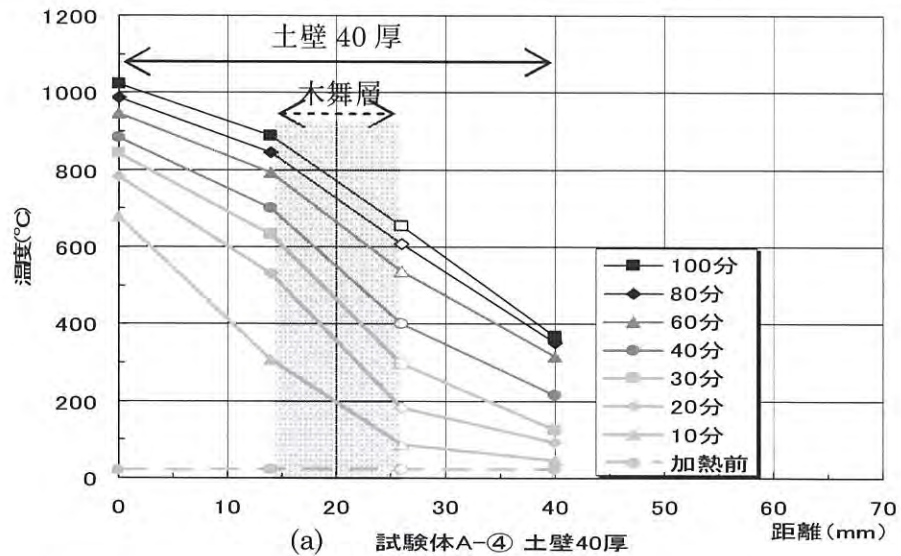


図 2-1-9 内部温度分布(土壁非加熱側塗り足し・A 面加熱)

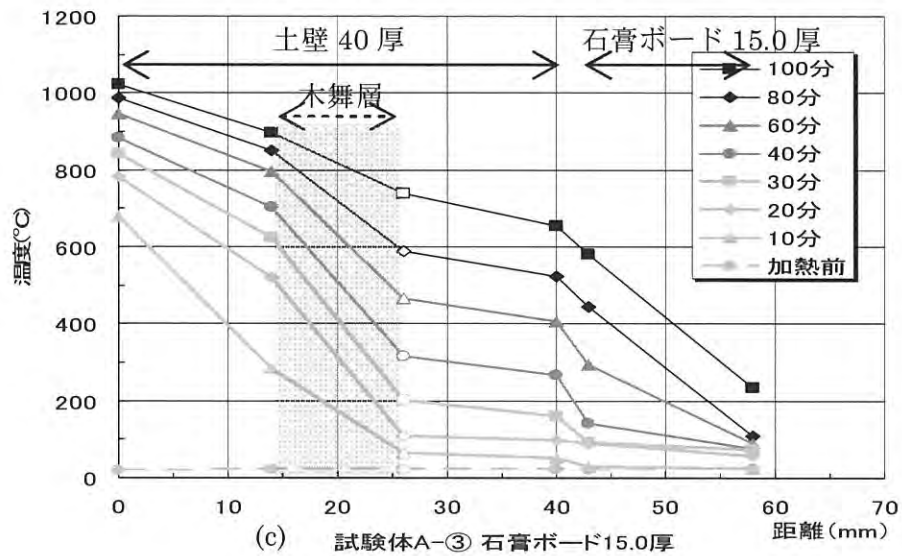
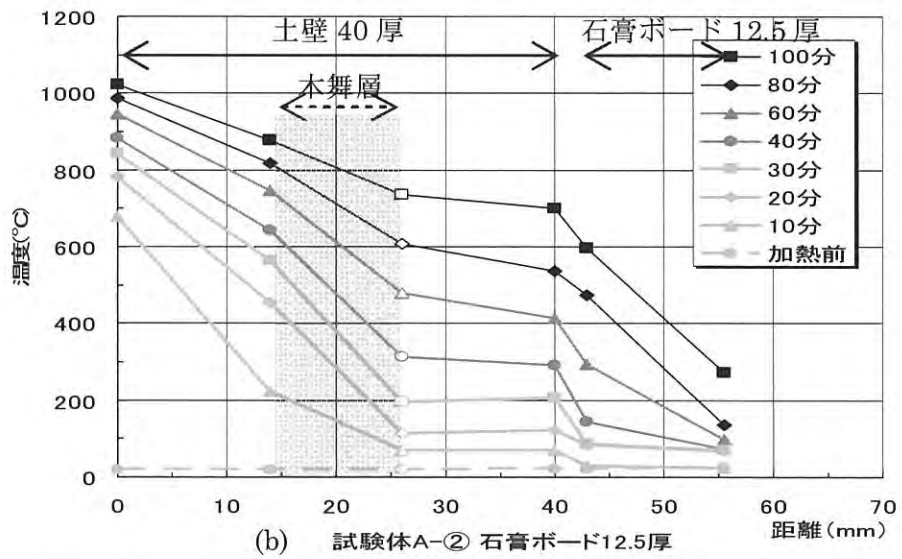
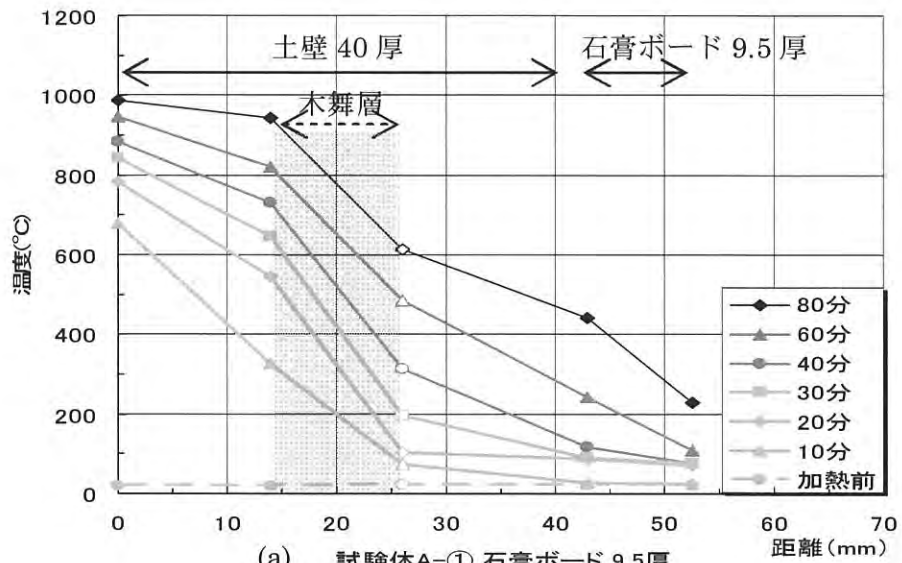


図 2-1-10 内部温度分布(石膏ボード非加熱側張り足し・A 面加熱)

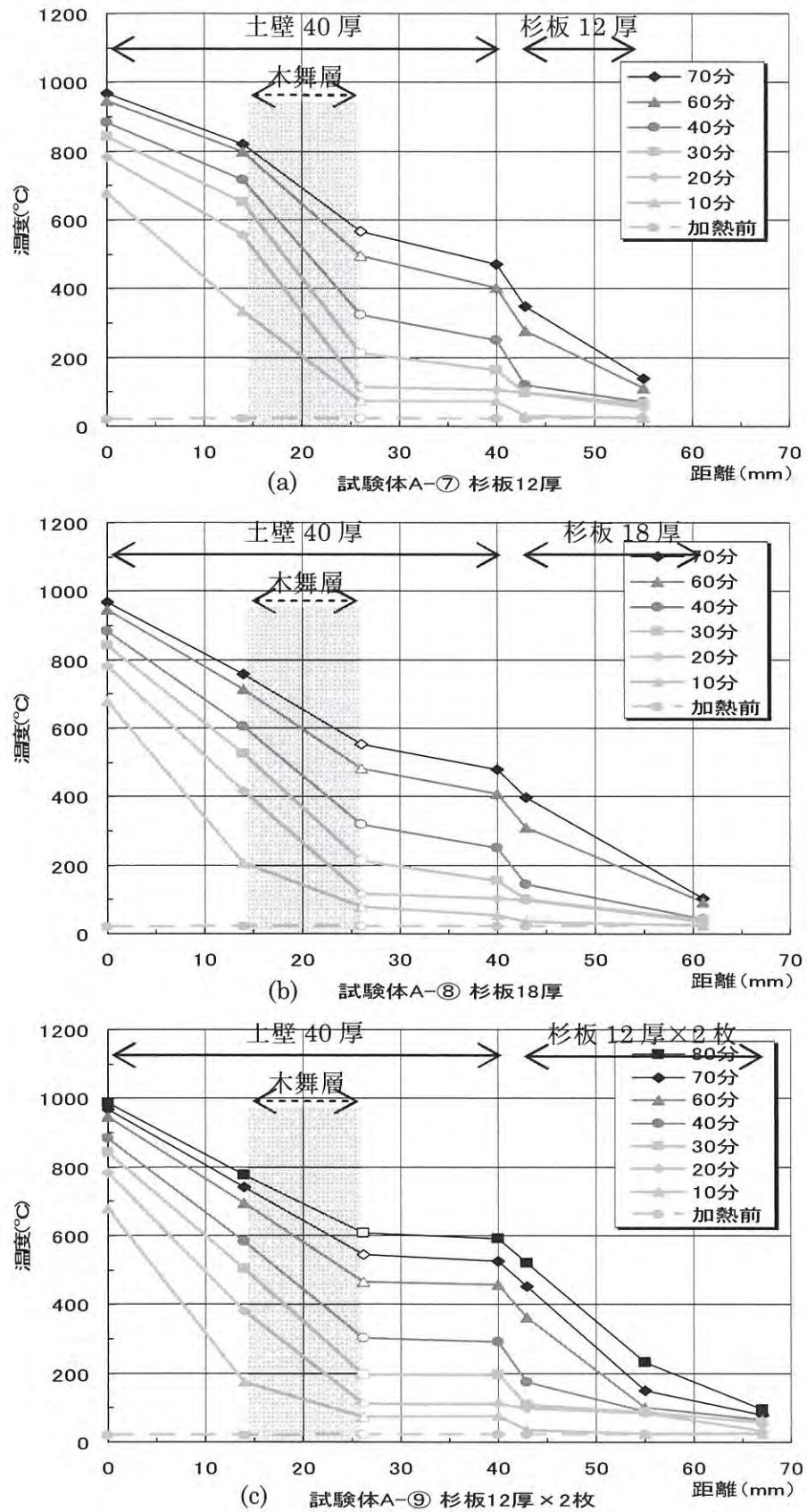


図 2-1-11 内部温度分布(杉板非加熱側張り足し・A面加熱)

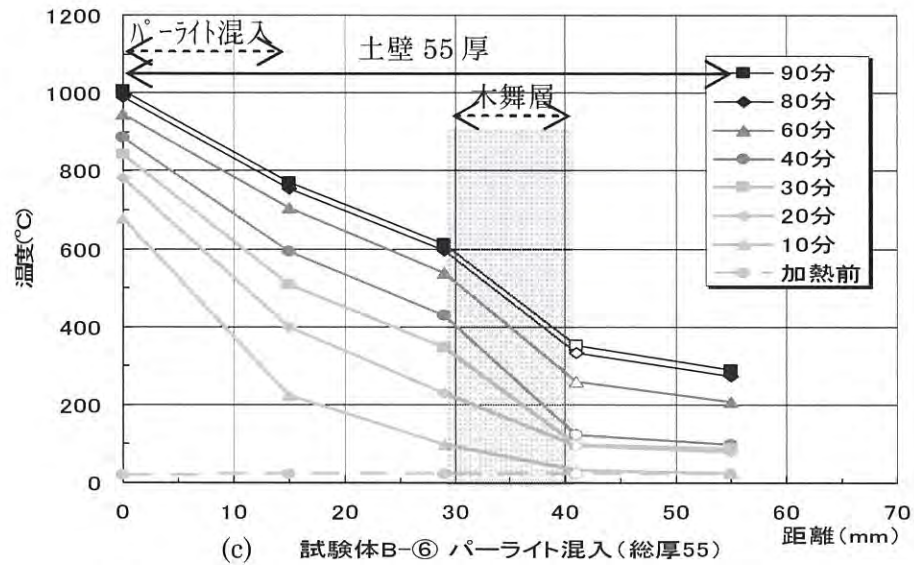
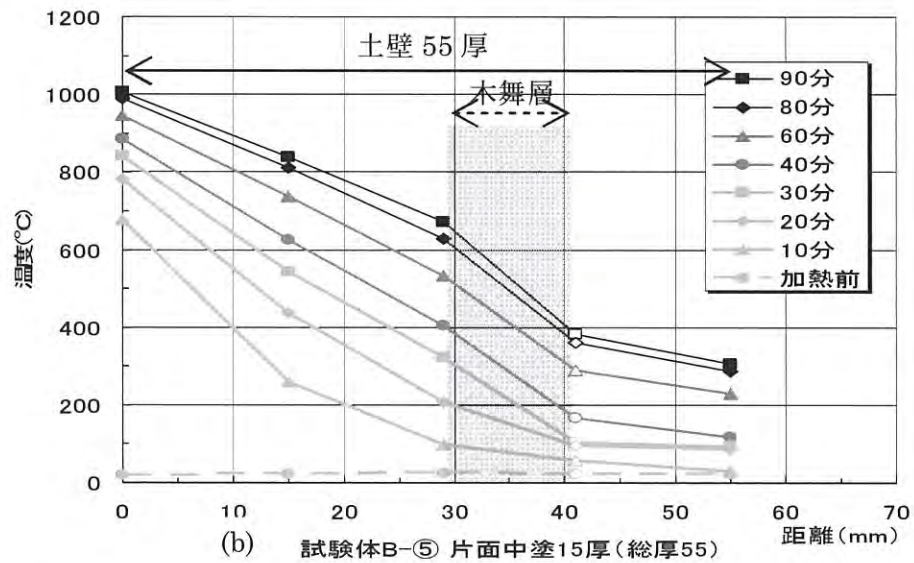
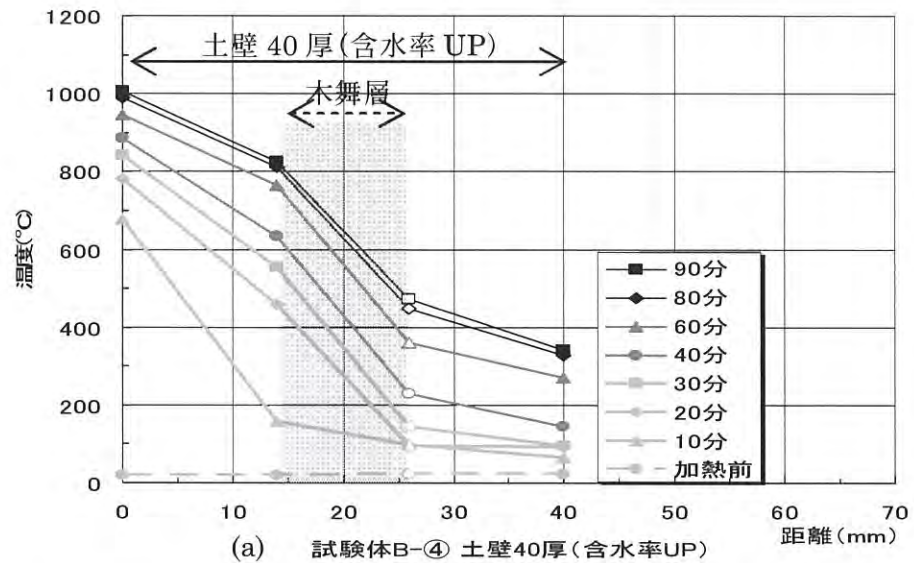


図 2-1-12 内部温度分布(土壁加熱側塗り足し・B 面加熱)

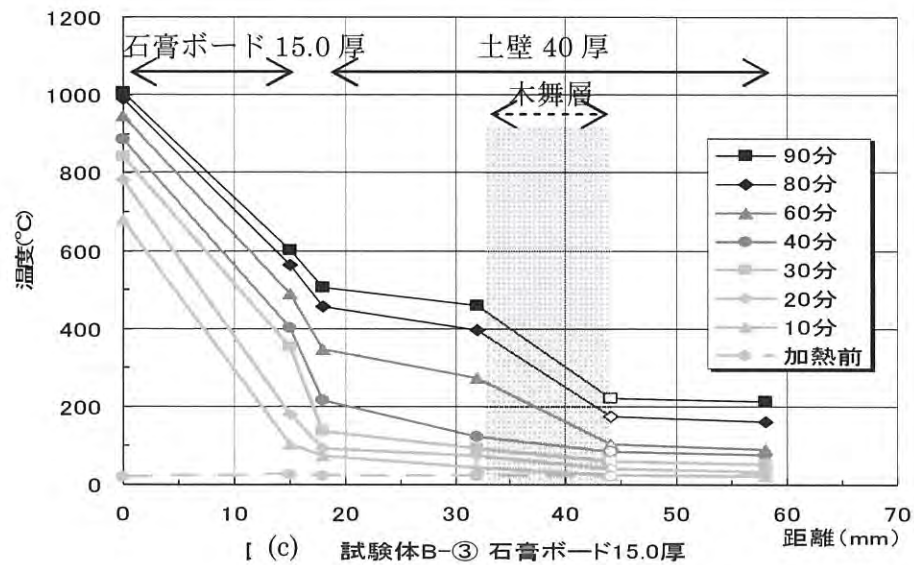
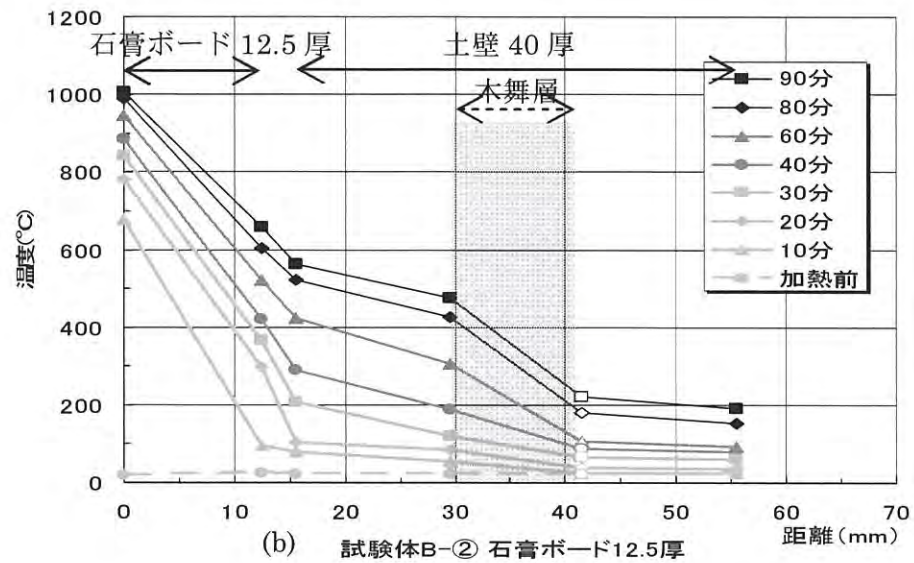
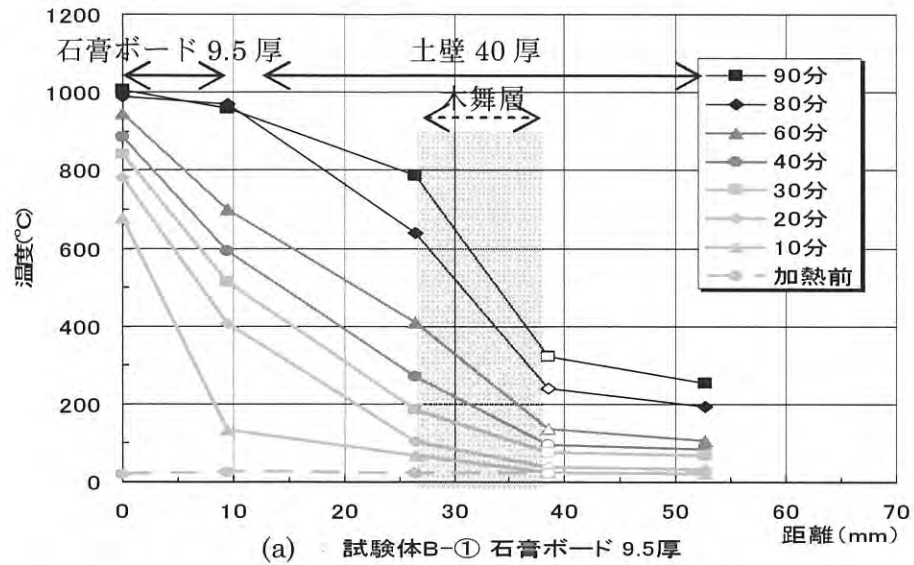


図 2-1-13 内部温度分布(石膏ボード加熱側張り足し・B 面加熱)

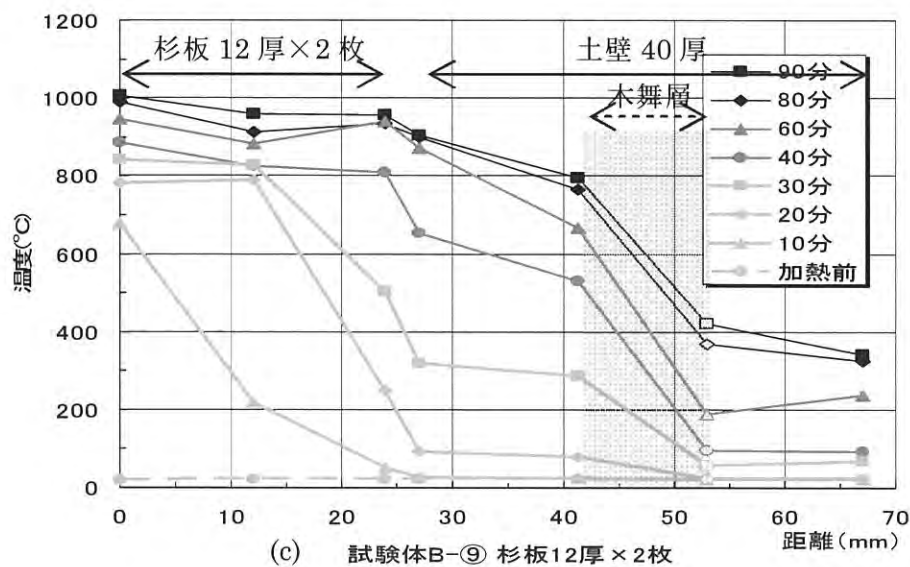
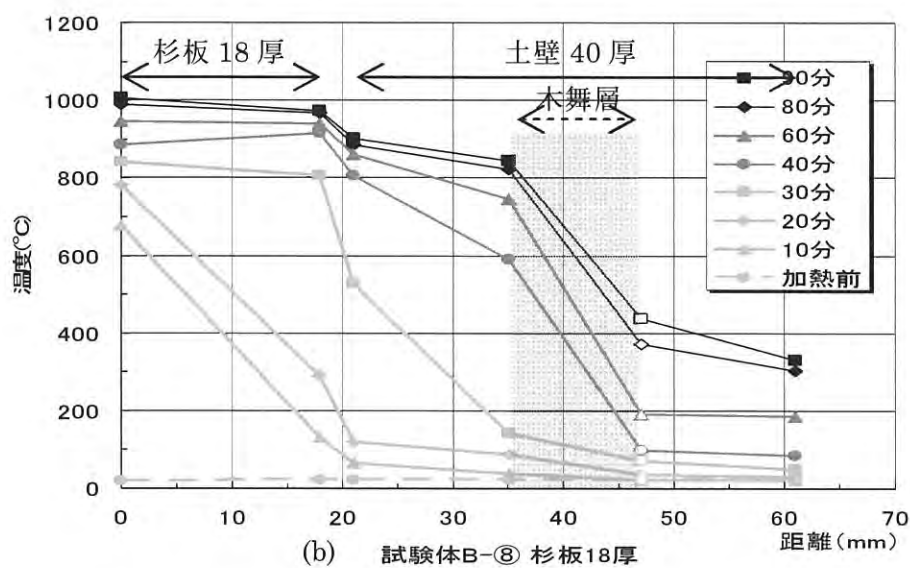
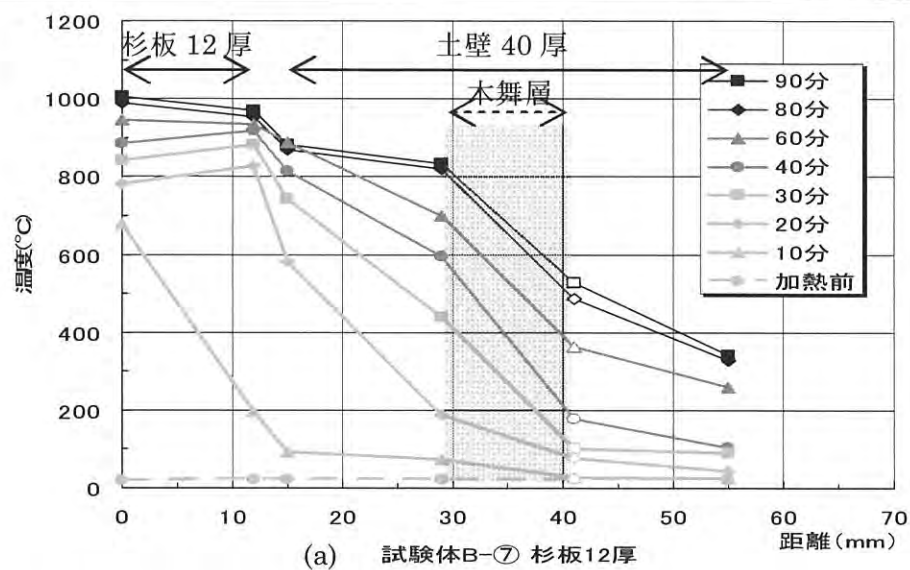


図 2-1-14 内部温度分布(杉板加熱側張り足し・B 面加熱)

2.6 考察

図 2-1-15、16 は加熱面からの距離と、遮熱性の基準として耐火試験で用いられる初期温度 +180K の温度上昇時間の関係を示している（この実験において初期温度は 23℃であった）。A 面加熱の石膏ボードと杉板を張り足した仕様については、土壁部分のデータも加えて示し、B 面加熱については、これら被覆材の厚みにより土壁部分の加熱面からの距離は変化するため、比較に適さないので省いた。

加熱面からの距離に対する温度上昇時間（180K）は、材料種別でみると A 面 B 面共に石膏ボードが最も高いといえる。しかし石膏ボードは雨のかかる屋外には設置できないため室内への防火改修に限られる。杉板は屋内外どちらにも施工は可能であり、土壁を同じ厚みだけ塗り足した場合と同等の値を示している。また石膏ボードあるいは杉板を張り足した仕様では、土壁のみの場合に比べて、土壁部分の 40mm の位置での温度上昇時間（180K）が短くなっており、3mm の空気層を挟んで、石膏ボードまたは杉板表面の温度と大きな差ができています。内部温度分布の実験結果から、この空気層が断熱層の働きをしていることを示したが、これを裏付ける結果となっている。

杉板仕様
石膏ボード仕様
土壁仕様

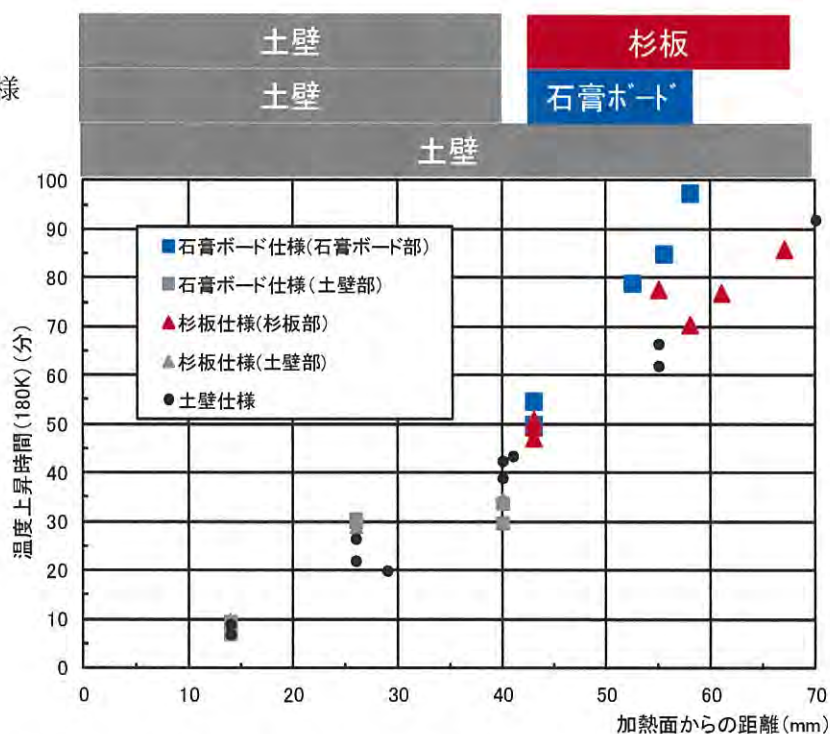


図 2-1-15 温度上昇時間(180K)と加熱面からの距離の関係(A 面加熱)

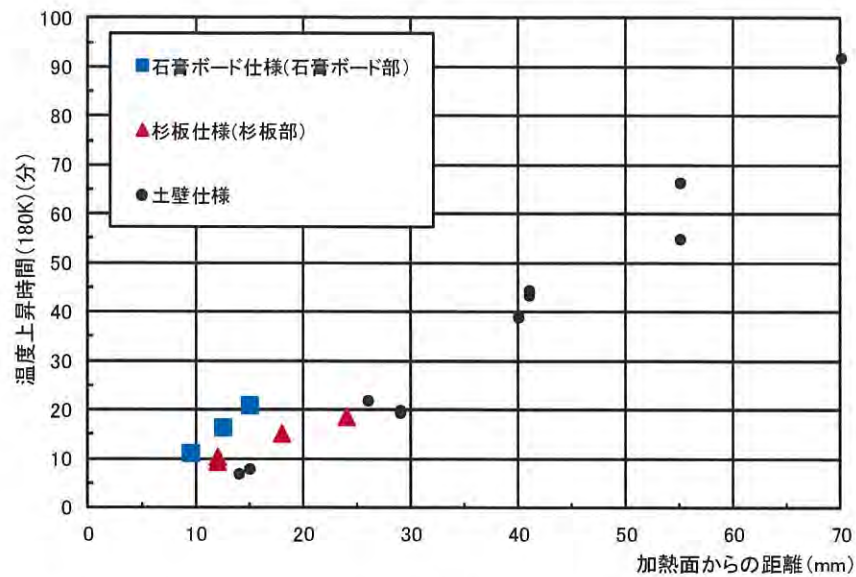


図 2-1-16 温度上昇時間(180K)と加熱面からの距離の関係(B 面加熱)

図 2-1-17 に土壁仕様（試験体 A-④～⑥、B-④～⑥）のみを取り出して、内部温度を含む土壁各断面の加熱面からの距離と温度上昇時間(180K) の関係を示す。塗り込めで示すのは内部温度であり、白抜きで表わすのは裏面温度である。裏面からの失熱の影響が考えられるため、区別して示した。また、青色で示すのは、含水率を上げた試験体 B-④の温度測定値である。

温度測定履歴の実験結果から予測したように、裏面で測定した温度は土壁内部で測定したものに比べて若干低い値を示す傾向にあるものの、総厚による影響は少なく、加熱面からの距離が等しければ温度上昇時間(180K) に大きな違いはない。またデータ数が限られているが、含水率の変化による影響については、含水率が高くなれば温度上昇時間(180K) も大きくなる傾向にある。

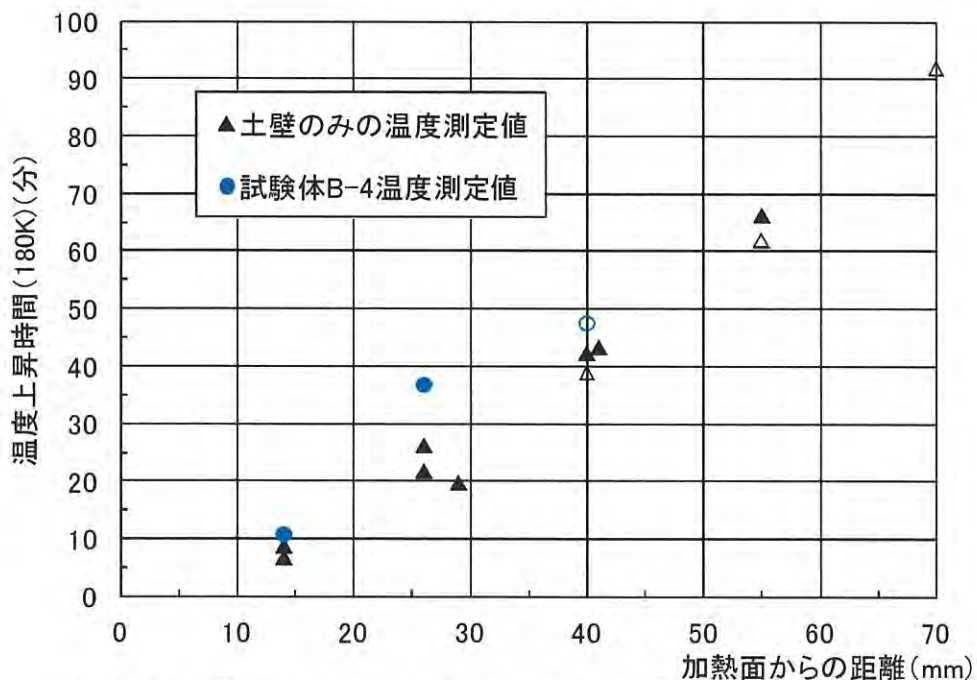


図 2-1-17 温度上昇時間(180K)と加熱面からの距離の関係(土壁のみ)

含水率が高くなると温度停滞時間も長くなる考察を得ており、温度停滞時間の差が温度上昇時間(180K)にも現れていると考えられる。図2-1-18~23に各仕様の裏面温度履歴の比較を示す。土壁40mmで温度上昇時間(180K)が39分となり(文献14では土壁40mmで38分)、塗り足しを行なうことで最大53分の向上(土壁70mmで温度上昇時間(180K)が92分)が見られた。塗り足しを行うことで、温度上昇の速度と温度停滞時間に変化がみられ、壁厚が大きくなるほど、温度上昇の速度は緩やかになり、温度停滞時間は長くなることが分かる。また同一の壁厚における温度停滞時間の前後では温度上昇速度に大きな変化はないといえる。図2-1-18と19の土壁55mm厚の違いは、塗り足しを加熱側に行ったか非加熱側に行ったかの違いで、内部の木舞位置の違いと考えてよい。データ数が限られているが、今回の実験では木舞位置が加熱側に近い方が温度上昇時間(180K)が大きくなった。木舞層が炭化することにより熱伝導率が下がっている可能性が考えられる。土壁はIS0834の急激な加熱によってもひび割れ、亀裂等は見られず、遮熱性限界温度を超えた後も安定した温度上昇を保ち続けた。遮熱性能としては反映されないが、温度上昇時間(180K)に達した後も遮炎性・非損傷性を保ち続けることは土壁の特性といえる。ただし実大規模の載荷加熱実験においては、軸部との取合部で燃え抜けが生じたり、軸部の崩壊に引っ張られて土壁の亀裂や部分的な脱落が観察されており⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾、土壁の特性を生かすには軸部の遮炎性・非損傷性が保たれることが前提である。

次に防火改修方法として、石膏ボードまたは杉板を張り足した仕様について考察を行う。図2-1-20と21を比較すると、石膏ボードを張り足す場合、加熱側であっても非加熱側であっても全体の温度上昇時間(180K)で見た場合は大きな違いは見られない。しかし非加熱側に張り足した場合は、石膏ボードが厚くなるほど温度上昇時間(180K)が延びるのに対し、加熱側に張り足した場合は、15mm厚のものが12.5mm厚のものより温度上昇時間(180K)が短くなる結果となった。これは写真2-1-2で見たように、亀裂の入り方が影響しているものと考えられる。また杉板を張り足す場合は、加熱側に張り足すか非加熱側に張り足すかで全体の温度上昇時間(180K)が約20分程度違い、大きく変化している(図2-1-22、23)。これは加熱側に張り足した場合、燃え抜けるまでの時間を稼ぐ意味合いが強く、燃え抜けた後の効果はゼロに等しいのに対し、非加熱側に張り足した場合は、遮熱性限界温度に達するまで継続して、裏面温度上昇の抑制に寄与することができるからである。このように加熱によってひび割れや亀裂、燃え抜けが生じる面材は、そのような恐れのない土壁の裏側に配することで、その遮熱性能を十分に発揮できるといえる。しかし、杉板のように有機質な面材を非加熱側に張り足す場合は、炎に直接曝されなくともある温度に達すると、本研究でも見られたように燃えだす危険性があることに留意すべきである(図2-1-22)。ちなみに加熱側に張り足した場合(図2-1-22)は、同じ時間で既に遮熱性限界温度は超えているものの、土壁は燃えないため遮炎性が担保されている。ただし、室内では壁面に近接してカーテンなどの可燃物がある状況も考えられるため、やはり火災に曝される方向が予め分かっているような場合には、ひび割れや亀裂といった脆性的な欠陥を生じにくい素材を加熱側に配する方が有利だといえる。

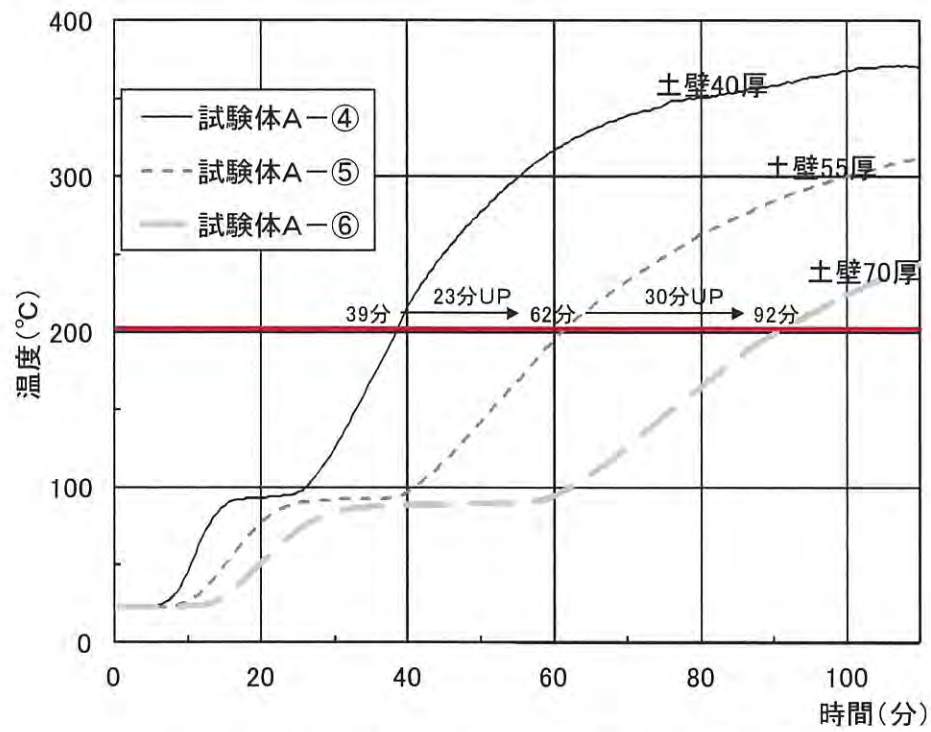


図 2-1-18 裏面温度履歴の比較(土壁加熱側に塗り足し)

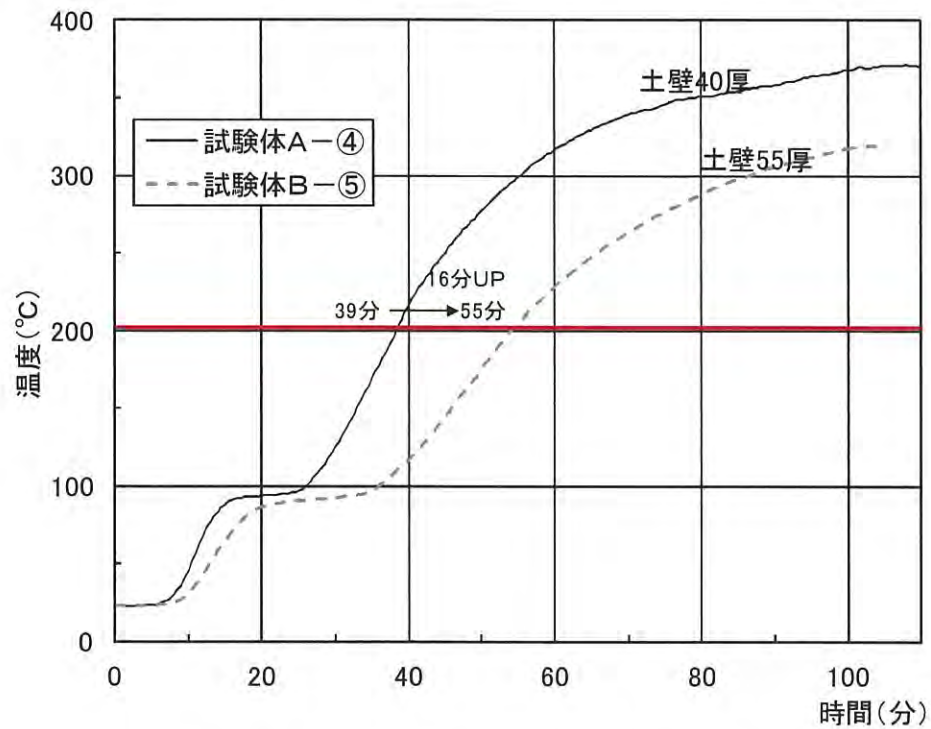


図 2-1-19 裏面温度履歴の比較(土壁非加熱側に塗り足し)

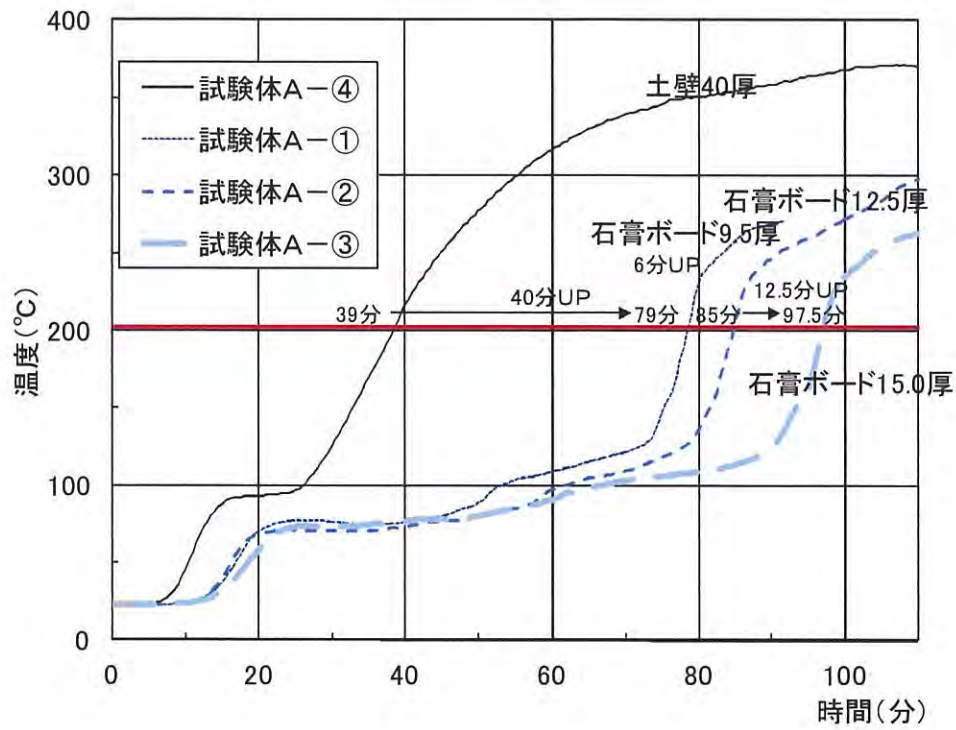


図 2-1-20 裏面温度履歴の比較(石膏ボード非加熱側に張り足し)

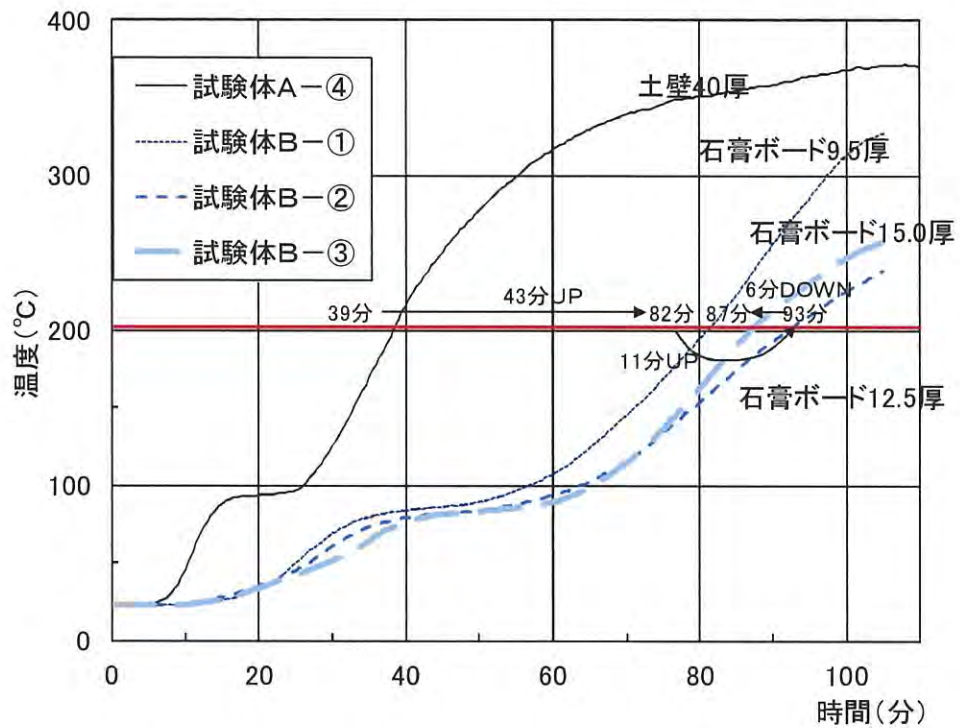


図 2-1-21 裏面温度履歴の比較(石膏ボード加熱側に張り足し)

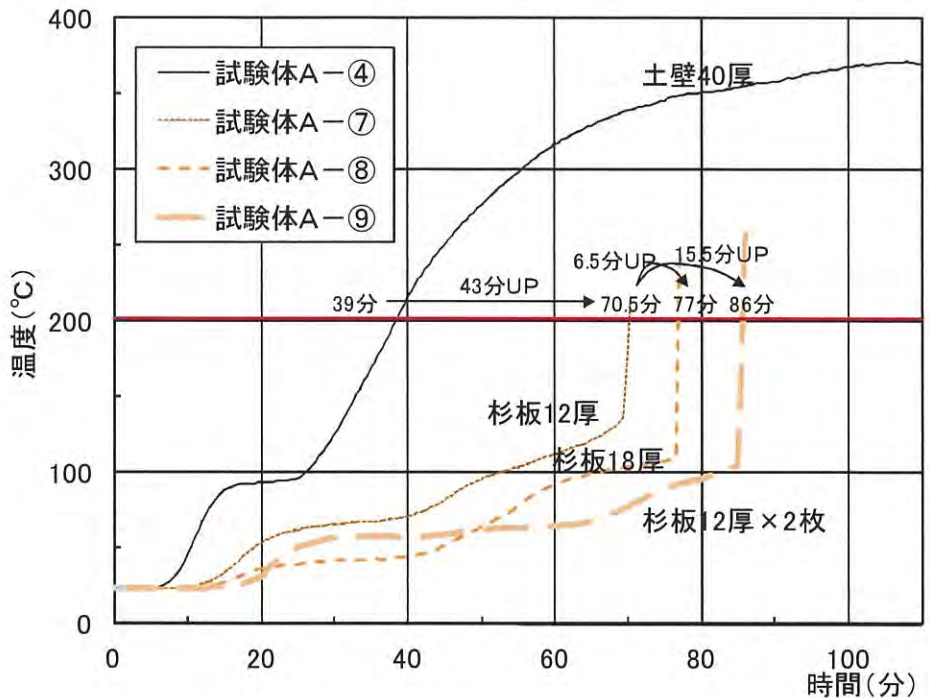


図 2-1-22 裏面温度履歴の比較(杉板非加熱側に張り足し)

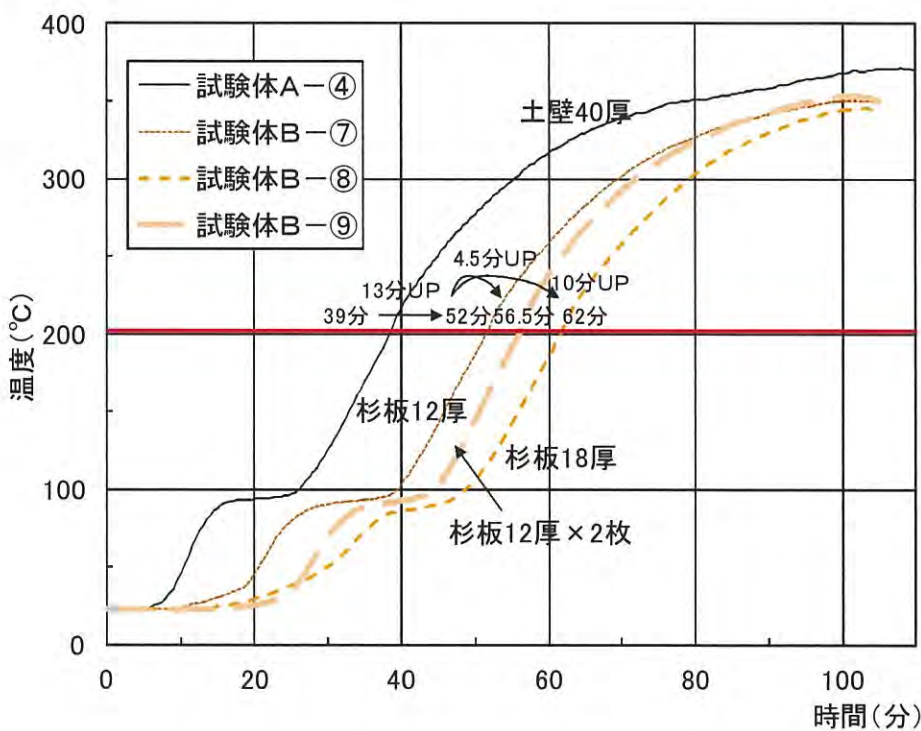


図 2-1-23 裏面温度履歴の比較(杉板加熱側に張り足し)

図 2-1-24 に実験で得られた加熱面からの距離と温度停滞時間の関係を示す。温度停滞の始まりと終わりを区別するため、温度停滞時間を「温度上昇速度が $2^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 以下の期間」と定義した。

- ・加熱面からの距離が大きくなるほど、温度停滞時間は長くなる傾向にある。
- ・しかし、加熱面からの距離が 26mm 以下では 0 分となっており、加熱面近くでは温度停滞が観測されなかった。

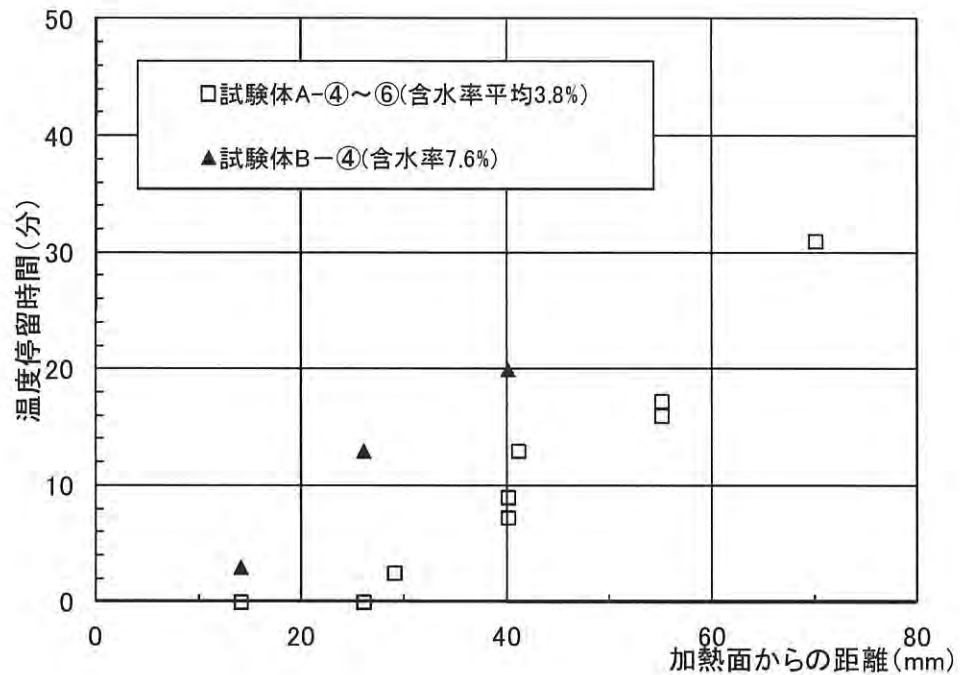


図 2-1-24 温度停滞時間

2.7 まとめ

土塗り厚および石膏ボードと杉板による被覆厚と遮熱性能の関係を把握するために、ISO834標準加熱曲線を用いて加熱試験を行った結果、以下のような知見を明らかにした。

- ・土壁の温度上昇時間(180K)は、加熱面からの距離に応じて一定の値をとり、総厚に対する影響は少ないことが分かった。
- ・実験で水分蒸発の影響とみられる温度停滞時間が見られた。この温度停滞時間も主として加熱面からの距離に応じて変化しており、距離が同じなら土壁の総厚による影響は小さいことが分かった。その間隔は加熱側に近いほど短く、非加熱側に向かうほど長くなる傾向にある。そしてこの温度停滞域は時間が進むにつれて、加熱側から徐々に非加熱側へと推移していくことが分かった。この温度停滞は石膏ボードについても起こることが確認されたが杉板では顕著に現れなかった。
- ・また土壁においては、温度停滞前後の温度上昇速度はほとんど変わらないように思われた。

第3章 加熱温度一定の条件下における土壁の温度簡易予測式

前章では標準加熱曲線下における土壁の加熱実験から、土壁の温度上昇時間(180K)は、総厚に概ね関係なく、加熱面からの距離に応じて一定の値をとることが分かった。また実験で用いた土壁の含水率の範囲では、水分蒸発による温度停滞時間の前後において、土壁の温度上昇速度にほとんど違いはみられなかった。このことから、水分を含む壁(含湿壁と呼ぶ)がある温度まで上昇する時間は、

①水分の影響のない乾燥状態における壁(乾燥壁と呼ぶ)がある温度まで上昇する時間

②壁体内水分の蒸発による温度停滞時間

①②を足し合わせることで予測できるのではないかと推定された。そこで本章では、最も単純化加熱条件である加熱温度一定の条件下において、この仮説を裏付けるために、乾燥壁の温度上昇モデルと水分蒸発モデルについて提案を行う。また簡易モデルの検証のため数値計算モデルを作成し、簡易モデルの適用範囲およびパラメーターの推定を行う。

3.1 含湿壁の温度上昇時間について簡易予測手法の提案

耐火試験で区画壁の遮熱性を評価する場合、温度上昇がある一定の値に達するまでの時間(温度上昇時間と呼ぶ)で評価されることが多く、初期温度+180Kの温度上昇時間を遮熱性能として評価している。第2章の土壁の加熱実験において、図3-1-1に実験で観測された、加熱面からの距離が異なる2点の温度測定履歴を概念的に示す。加熱面からの距離が大きくなるほど、温度上昇速度が緩やかになり、水分蒸発の影響とみられる温度停滞時間も長くなる傾向が見られた。温度停滞時間の前後では土壁の温度上昇速度にほとんど違いはみられないことから、水分を含む壁(含湿壁と呼ぶ)の温度上昇時間は、水分の影響のない乾燥状態における壁(乾燥壁と呼ぶ)の温度上昇時間と、温度停滞時間を足し合わせることで簡易的に予測できるのではないかと推定する。

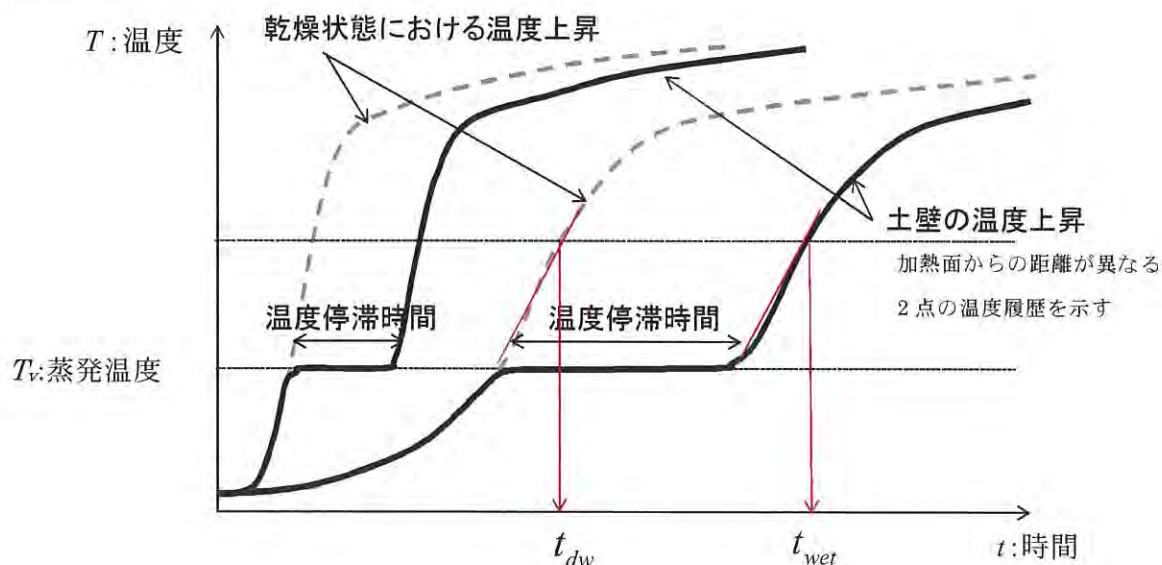


図 3-1-1 土壁の温度履歴(概念図)

ただし、温度停滞時間は実際には緩やかに上昇を続けるものがあつたり、加熱表面近くでは観測されなかったりしたため、図 3-1-2 に青線で示すように、解析上は蒸発が完了する点が徐々に非加熱側へと移行していく、移動境界モデルとして取り扱う。このとき、蒸発温度に達する含湿壁と乾燥壁の時間差を蒸発時間と定義すると、水分蒸発後の温度上昇時間は以下のように表現できるのではないかと推定する。

$$t_{wet} = t_{dw} + t_v \quad (3.1.1)$$

ここに

t_{wet} : 含湿壁の温度上昇時間

t_{dw} : 乾燥壁の温度上昇時間

t_v : 蒸発時間

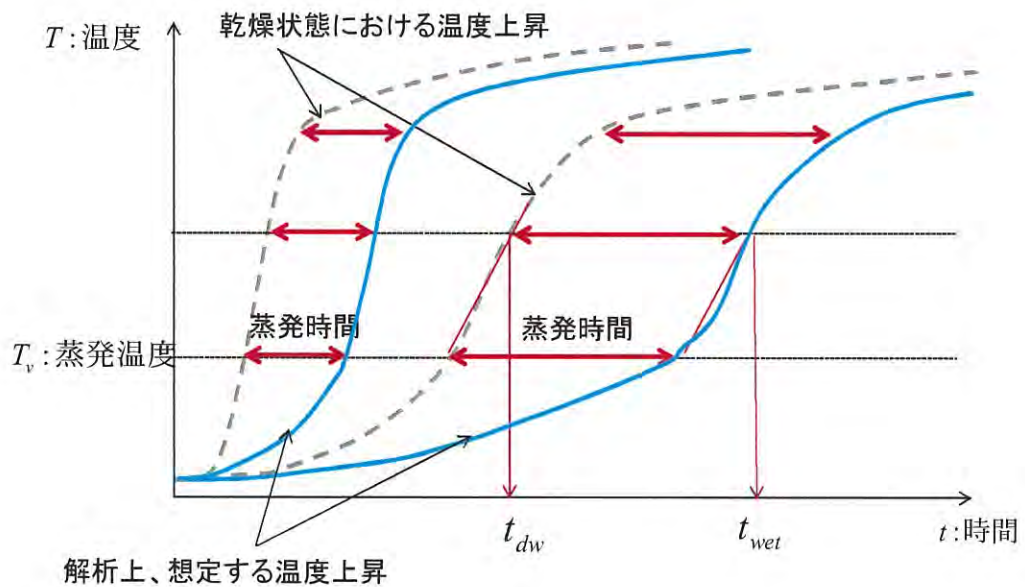


図 3-1-2 土壁の温度履歴(概念図)

そこでこの仮説を裏付けるために、乾燥壁の温度上昇時間と蒸発時間を求める方法について考える。

3.2 乾燥壁の温度上昇簡易予測モデル

火災加熱を受けたときの温度上昇について、半無限固体の表面温度が瞬時に引き上げ保たれる場合に対する熱伝導理論解を用いて、乾燥壁の温度上昇時間を予測する方法について考える。

(a)半無限固体の概念を適用すると、 $x \rightarrow \infty$ での温度は常に初期温度に保たれることになり、非定常熱伝導の理論解を得ることができる。建築空間における壁を想定した場合、有限な厚さを持つことになり、熱が裏面まで達することがないとする半無限固体の概念を、現実の意味で適用できるわけではない。しかし遮熱性を期待するような建築材料は熱伝導率が低いいため、半無限固体として近似できるのではないかと考える。また表面温度が瞬時に高温に引き上げられるという条件も実際の加熱条件とは異なるが、限られた空間で高温の気体に曝される場合、あまりに熱伝導性が良いものでない限り、加熱温度と表面温度は大差なく、両者を近似できるのではないかと考える。

熱伝導方程式について

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.2.1)$$

次の初期条件及び境界条件の下に

$$\left. \begin{aligned} T &= T_0 & (t=0, 0 \leq x < \infty) \\ T &= T_s & (0 \leq t < \infty, x=0) \\ T &= T_0 & (0 \leq t < \infty, x=\infty) \end{aligned} \right\} \quad (3.2.2)$$

解は以下のように与えられることが知られている⁽⁹⁾。

$$\begin{aligned} \frac{T(x,t) - T_0}{T_s - T_0} &= 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \\ &= \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \end{aligned} \quad (3.2.3)$$

ここに

$T(x,t)$: ある点のある時間における温度 (K)

T_s : 加熱側表面温度 (K)

T_0 : 初期温度 (K)

α : 熱拡散率 (m^2/s)

t : 時間 (s)

x : 加熱面からの距離 (m)

(b) 式 3.2.3 の左辺は無次元温度上昇であり、任意の位置、時間における温度が、フーリエ数で表わされる $F_0^{1/2} = x/(\alpha t)^{1/2}$ だけで決まることを示している。 $\operatorname{erfc}()$ で表わされる余誤差関数は、誤差関数表を対照して解くことができるが、冒頭に提案した仮説においては、最終的に乾燥壁の温度上昇時間と温度停滞時間を足し合わせる必要があるため、誤差関数を 1 次関数で近似して、式 3.2.3 を時間 t を求める式として表わすことを考える。

式 3.2.3 において式の形を簡単にするために

$$\begin{aligned}\Delta T(x, t) &= T(x, t) - T_0 \\ \Delta T_s &= T_s - T_0\end{aligned}\quad (3.2.4)$$

および

$$\psi = \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_s}, \quad \xi = \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\quad (3.2.5)$$

とおくと

$\psi = \text{erfc}(\xi)$ は図 3-2-1 の黒の実線で示される。

この曲線をいくつか分割して近似する方法は任意であるが、ここでは図 3-1-1 に赤線で示すように、以下の 5 つの直線で線形近似を行う。

$$\begin{cases} \psi = 1 - \xi & 0 \leq \xi \leq 0.6 \\ \psi = \frac{1}{1.5}(1.2 - \xi) & 0.6 \leq \xi \leq 0.9 \\ \psi = \frac{1}{3}(1.5 - \xi) & 0.9 \leq \xi \leq 1.2 \\ \psi = \frac{1}{6}(1.8 - \xi) & 1.2 \leq \xi \leq 1.5 \\ \psi = \frac{1}{10}(2 - \xi) & 1.5 \leq \xi \leq 2.0 \end{cases}\quad (3.2.6)$$

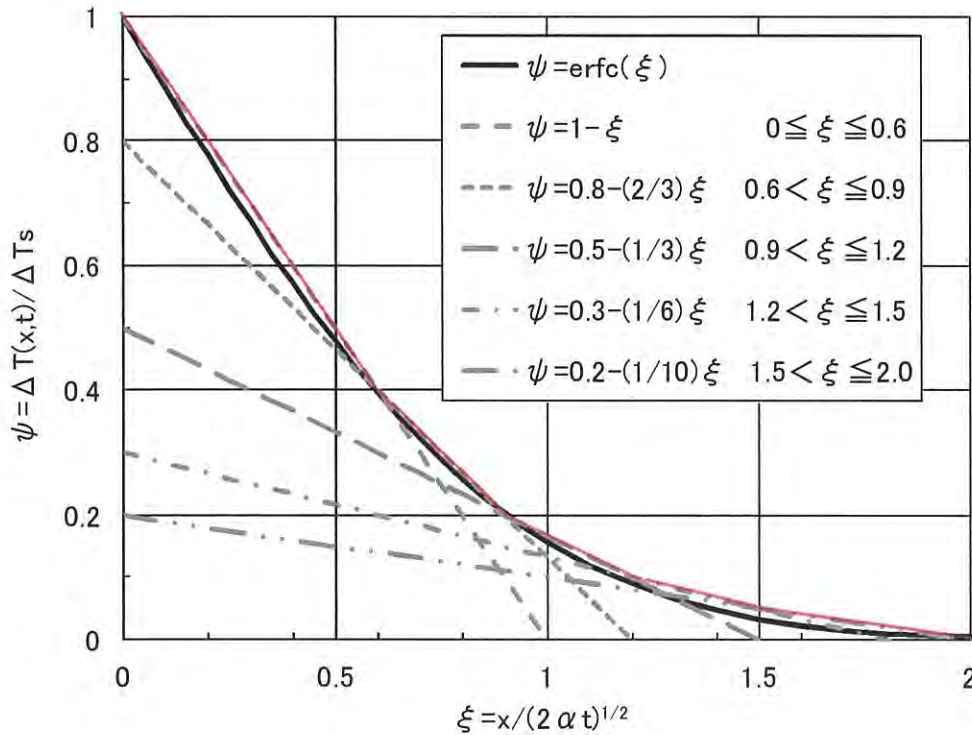


図 3-2-1 余誤差関数の近似

これを一般式の形で表わし、

$$\psi = \frac{1}{B}(A - \xi) \quad (3.2.7)$$

式 3.2.5 を代入して、線形近似の各範囲における乾燥壁の温度上昇 $\Delta T_{dw}(x, t)$ を求める簡易予測式が得られる。ただし、係数は表 3-2-2 の対応表で求めればよい。

$$\frac{\Delta T_{dw}(x, t)}{\Delta T_s} = \frac{1}{B_n} \left(A_n - \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \quad \left\{ L_{n-1} < \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \leq L_n \right\} \quad (3.2.8)$$

ここに

$\Delta T_s = T_s - T_0$: 加熱側表面での温度上昇 (K)

x : 加熱面からの距離 (m)

α : 熱拡散率 (m^2/s)

t : 時間 (s)

n : 近似番号

L_{n-1}, L_n : 近似番号 n を適用する無次元数 $1/2F_0^{1/2}$ の上限と下限

A_n, B_n は、 $L_{n-1} < \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \leq L_n$ の適用範囲に応じて変化する係数 (表 3-2-2 参照)

式 3.2.5 は、位置と時間が分かれば温度上昇を求めることができる式であり、 x を固定すればある位置 x での温度履歴を、 t を固定すれば時間 t での温度分布を求めることができる。

表 3-2-2 簡易予測式の係数対応表

n	A_n	B_n	適用範囲		
			L_{n-1}	$1/2F_0^{1/2}$	L_n
1	2	10	2.0	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \geq 1.5$	
2	1.8	6	1.5	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \geq 1.2$	
3	1.5	3	1.2	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \geq 0.9$	
4	1.2	1.5	0.9	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \geq 0.6$	
5	1	1	0.6	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \geq 0$	

(c) 余誤差関数を1次関数で近似した目的は、ある温度上昇をもたらす時間を求める式に変換するためである。そこで余誤差関数を線形近似した式 3.2.6 を、 ξ から ψ を求める式に変換する。

$$\begin{cases} \xi = 2 - 10\psi & 0 \leq \psi \leq 0.05 \\ \xi = 1.8 - 6\psi & 0.05 \leq \psi \leq 0.1 \\ \xi = 1.5 - 3\psi & 0.1 \leq \psi \leq 0.2 \\ \xi = 1.2 - 1.5\psi & 0.2 \leq \psi \leq 0.4 \\ \xi = 1 - \psi & 0.4 \leq \psi \leq 1.0 \end{cases} \quad (3.2.8)$$

これを一般式の形で表わし、

$$\xi = A - B\psi \quad (3.2.9)$$

式 3.2.5 を代入して時間 t について整理すると、線形近似の各範囲における乾燥壁の温度上昇時間 t_{dw} を求める簡易予測式が得られる。

$$t_{dw} = \left(A_n - B_n \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_s} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_s} \leq R_n \right\} \quad (3.2.11)$$

式 3.2.8 と式 3.2.11 は、元は余誤差関数を近似した同一の式を変形しただけなので、係数の適用範囲については無次元数 $1/2F_0^{1/2}$ および無次元温度 $\Delta T(x, t)/\Delta T_s$ のどちらに対しても示すことができ（表 3-2-3）、両者は対応している。

例えば、

$$\frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_s} = R_n \text{ のとき、} \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} = L_n \text{ となる。} \quad (3.2.12)$$

ここに

$\Delta T(x, t) = T(x, t) - T_0$: 求めたい温度上昇 (K)

t_{dw} : 乾燥壁の温度上昇時間 (s)

R_{n-1}, R_n : 近似番号 n を適用する無次元温度の下限と上限

A_n, B_n は、 $R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_s} \leq R_n$ の適用範囲に応じて変化する係数（表3-2-3参照）

表 3-2-3 簡易予測式の係数対応表

n	A_n	B_n	適用範囲			適用範囲		
			L_{n-1}	$1/2F_0^{1/2}$	L_n	R_{n-1}	無次元温度	R_n
1	2	10	2.0	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$	≥ 1.5	0	$\leq \frac{\Delta T(x,t)}{\Delta T_s} \leq$	0.05
2	1.8	6	1.5	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$	≥ 1.2	0.05	$\leq \frac{\Delta T(x,t)}{\Delta T_s} \leq$	0.1
3	1.5	3	1.2	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$	≥ 0.9	0.1	$\leq \frac{\Delta T(x,t)}{\Delta T_s} \leq$	0.2
4	1.2	1.5	0.9	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$	≥ 0.6	0.2	$\leq \frac{\Delta T(x,t)}{\Delta T_s} \leq$	0.4
5	1	1	0.6	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$	≥ 0	0.4	$\leq \frac{\Delta T(x,t)}{\Delta T_s} \leq$	1.0

3.3 水分蒸発簡易予測モデル

次に蒸発時間を予測する方法について考える。土壁の加熱実験では、温度停滞域が徐々に非加熱側へと移動していく現象が見られた。解析上は、温度停滞をないものと見なし、水分蒸発はある時間にはある1点（蒸発到達点）でのみ起きていると仮定して、蒸発到達点の動きを予測することで、水分の蒸発時間を求める。

図3-3-2は水分を含んだ壁における蒸発到達点の推移を示している。 T_f は加熱温度であり、加熱側表面温度が瞬時に加熱温度に上昇することを仮定している。また T_v を蒸発温度とする。黒の実線で示すのがある時間での温度分布であり、赤点で示すのが蒸発到達点である。水分蒸発はある時間にはある1点でのみ起きていると仮定すると、時間が進むにつれて蒸発到達点が壁体内を進んでいくと考えられる。なお水蒸気は周囲の温度上昇に影響を与えず、拡散するものとする。蒸発到達点における熱収支式を、流入した熱量が全て蒸発に使われていると考えて以下のように表わす。

$$\dot{q}'' \cdot dA \cdot dt = L_w \phi (\rho \cdot dx \cdot dA) \quad (3.3.2)$$

ここに

\dot{q}'' : 単位時間当たりの蒸発到達点への入射熱流束(kW/m^2s)

ϕ : 材料の乾燥質量に対する含水率(kg/kg)

L_w : 蒸発潜熱(kJ/kg)

ρ : 材料の密度(kg/m^3)

蒸発到達点の進む速度 v は、以下のように示され、

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{\dot{q}''}{\rho L_w \phi}$$

水分量に反比例することが分かる。

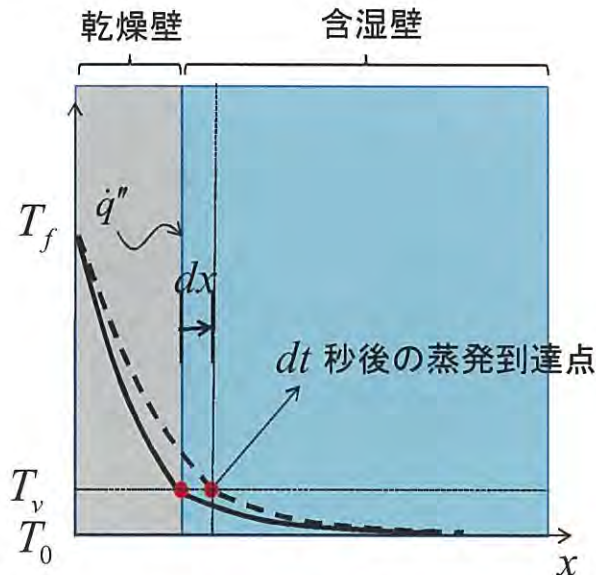


図3-3-2 含湿壁における蒸発到達点の移動速度

ここで、蒸発到達点への入射熱流束を、乾燥壁内を伝わる伝導熱流束として与えることについて考える。位置 x における温度上昇過渡期の伝導熱流束は正確には分からないが、加熱表面温度と蒸発温度の差を、加熱面からの距離で割った温度勾配に比例すると考え、比例定数 D を用いて次式で表わす。

$$\dot{q}'' = D \times \lambda \frac{T_f - T_v}{x} \quad (3.3.3)$$

ここに

D : 比例定数

x : 加熱面からの距離 (m)

T_f : 加熱温度 (K)

T_v : 蒸発温度 (K)

λ : 熱伝導率 (kW/mK)

加熱面からの距離が遠ざかるほど温度勾配の傾きが緩くなる（伝導熱流束が小さくなる）ことから、加熱面からの距離が遠ざかるほど蒸発到達点の移動速度は遅くなると考えられる。

式 3.3.3 を式 3.3.2 に代入して、求めたいのは蒸発に要する時間であるため、 dt について整理する。

$$dt = \frac{1}{D} \frac{\rho L_w \phi}{\lambda(T_f - T_v)} x dx \quad (3.3.4)$$

両辺を積分して

$$\int_0^t dt = \frac{1}{D} \frac{\rho L_w \phi}{\lambda(T_f - T_v)} \int_0^x x dx \quad (3.3.5)$$

下式のように加熱面からの距離 x までに含まれる水分の蒸発に要する時間 t を求める式が得られる。

$$t = \frac{1}{2D} \left(\frac{\rho L_w}{\lambda(T_f - T_v)} \right) \cdot \phi \cdot x^2 \quad (3.3.6)$$

$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$, $L_w = 2450$ (kJ/kg) を代入し、式 3.3.7 を蒸発時間 t_v の簡易予測式として提案する。

$$t_v = \frac{4.9 \times 10^3}{D} \left(\frac{\phi}{C_w(T_f - T_v)} \right) \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \quad (3.3.7)$$

ここに

α : 熱拡散率 (m^2 / s)

C_w : 比熱 (kJ / kgK)

ϕ : 部材乾燥質量に対する含水率 (kg / kg)

T_f : 加熱表面温度 (K)

T_v : 水分の蒸発温度 (K)

D : 比例定数

これによると、蒸発時間は含水率 ϕ と加熱面からの二乗に比例すると考えられ、後は比例定数 D が与えられれば蒸発時間を求めることができる。

付録

蒸発到達点の進む速度から蒸発時間を求める手法は、プール火災における液体燃料の液面の動きを予測する手法を参考にした⁽²⁵⁾。図 3-3-3 にプール火災における液面の推移を示す。また図の右に火災温度を T_f 、液体の蒸発温度を T_v 、初期温度を T_0 としたときの温度分布を示す。液体表面における熱収支式は、熱が流入した分、液体燃料のガス化が進むと考えると以下のよう

$$\dot{q}'' \cdot dA = \rho_f \frac{dx}{dt} dA \cdot h_{fg} \quad (3.3.8)$$

\dot{q}'' : 単位時間当たりの入射熱流束 (kW/m^2s)

ρ_f : 液体の密度 (kg/m^3)

h_{fg} : 燃料の蒸発潜熱 (kJ/kg)

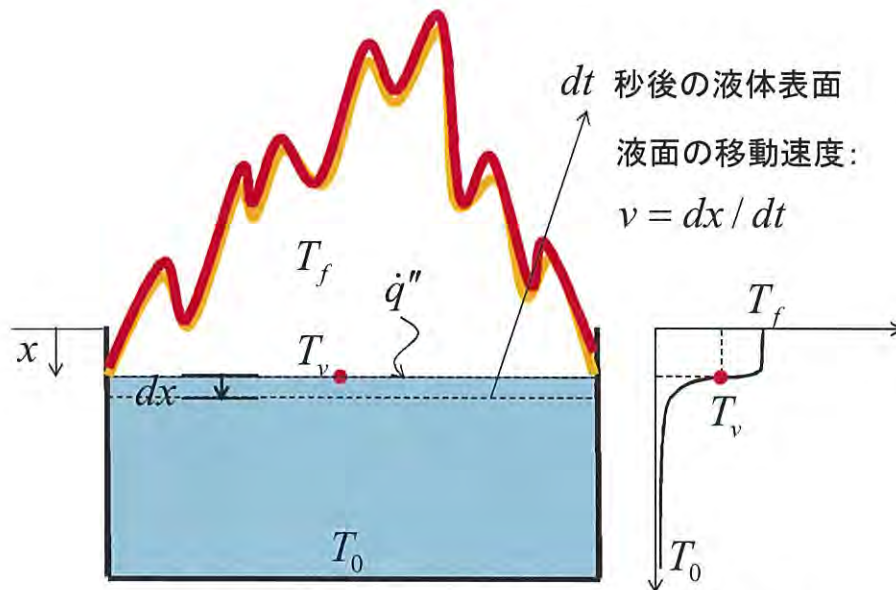


図 3-3-3 プール火災における液体表面の移動速度

また深さの十分に大きい液体燃料が定常的に燃焼し、一定速度 v で液面降下しているとき、液面下の温度分布は定常的なものになることが既往研究により示されている⁽²⁷⁾。

液体表面を原点として、深さ方向に距離 x をとる。座標原点は液面降下速度 v で下方に移動しているので、この座標から見ると、下から上に速度 v の液体燃料の流れがあるように見える。従って任意の深さ x に厚さ dx の部分を想定すると、熱伝導による上から下への熱の流入・流出があると同時に、下から上への流れに伴う熱の移動があることになる。この微小体積での熱収支式を考えると以下のよう

$$C_f \rho_f v \frac{dT}{dx} + \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad (3.3.9)$$

ここに

C_f : 液体の比熱 (kJ/kgK)

λ : 液体の熱伝導率 (kW/mK)

これを次の初期条件及び境界条件の下に

$$\left. \begin{aligned} T &= T_s \quad (0 \leq t < \infty, x = 0) \\ T &= T_0 \quad (0 \leq t < \infty, x = \infty) \end{aligned} \right\} \quad (3.3.10)$$

以下のように与えられることが知られている⁽⁹⁾。

$$\frac{T(x,t) - T_0}{T_s - T_0} = \exp\left(-\frac{\nu}{\alpha} x\right) \quad (3.3.11)$$

3.4 数値解析による検討課題

前節までに乾燥壁の温度上昇と水分蒸発に関する簡易モデルを提案した。しかしそれぞれにおいて以下のような課題が残されている。

(a) 乾燥壁の温度上昇モデルについての課題

- ・ 表面温度を加熱温度で近似することの妥当性の検証
- ・ 有限の厚さを持つ壁を半無限固体として近似することの妥当性の検証

(b) 水分蒸発モデルについての課題

- ・ 蒸発時間は含水率 ϕ と加熱面からの距離 x の二乗に比例することの検証
- ・ 蒸発時間の算定に必要な比例定数 D の算出

そこで簡易モデルの検証を目的として数値解析モデルを作成する。

3.4.1 数値解析モデルの概要

高温加熱を受ける壁体の温度上昇を求める数値解析については数多くの研究⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾があり、本研究で用いる数値解析モデルはこれらに対して新しい機能を追加するものではない。厚さに比較して面方向の拡がり大きい建築空間の壁では1次元で扱えると考え、1次元熱伝導方程式を差分化して数値解析モデルを作成した。図3-4-1に示すような有限の幅 L を持つ壁を幅方向に分割して、点線で示すようなコントロールボリューム内の熱収支を考え、求めた温度を黒点で示す位置の温度として代表させる。水分については蒸発潜熱の影響を考え、コントロールボリュームが規定の温度（蒸発温度または水和物の分解温度）に達した時点から、内部の水分量が0になるまで入射熱は水分の蒸発にのみ消費されるものとする。蒸発後の水蒸気は、周囲の温度上昇に影響を与えずに拡散するものとする。

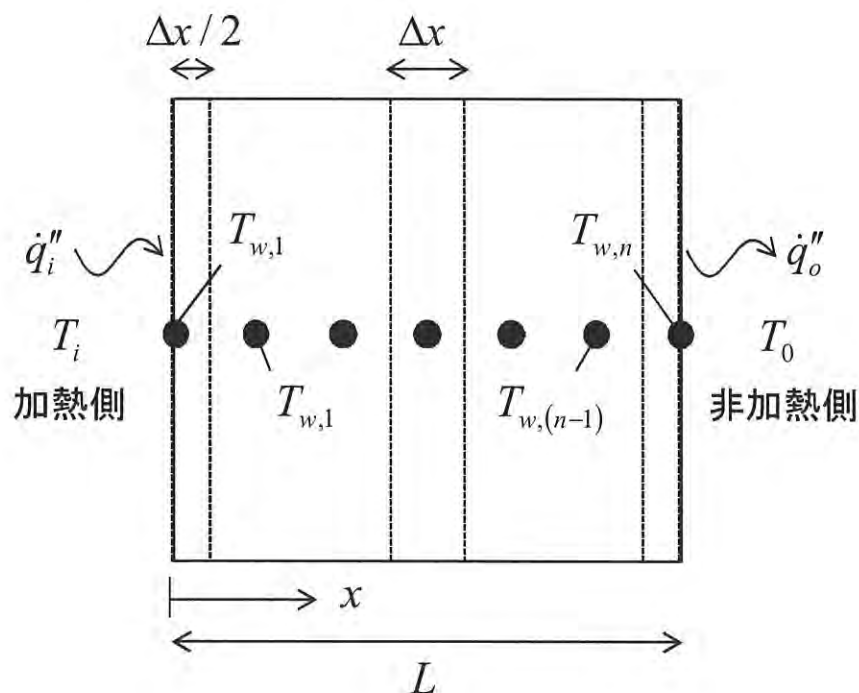


図3-4-1 1次元熱伝導モデル

(a)基本式

水分の蒸発潜熱による吸熱がある場合の1次元の熱伝導方程式は以下ようになる。

$$\rho C_w \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \dot{q}_v \quad (3.4.1)$$

この式は下記の境界条件とともに解かれることになる。

$$\left. \begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} &= \dot{q}_i'' \quad (x=0) \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} &= -\dot{q}_o'' \quad (x=L) \end{aligned} \right\} \quad (3.4.2)$$

右辺は壁表面への入射熱であり、以下の通りである。

$$\begin{aligned} \dot{q}_i'' &= h_i (T_f - T_{w,1}) + \varepsilon_i \sigma (T_f^4 - T_{w,1}^4) \\ \dot{q}_o'' &= h_o (T_{w,n} - T_o) + \varepsilon_o \sigma (T_{w,n}^4 - T_o^4) \end{aligned}$$

ここに

T : 温度 (K)

ρ : 密度 (kg/m^3)

C_w : 比熱 ($kJ/kg \cdot K$)

λ : 熱伝導率 ($kW/m \cdot K$)

\dot{q}_v : 水分蒸発による吸熱量 (kW/m^3)

\dot{q}_i'' : 加熱側表面からの流入熱流束 (kW/m^2)

\dot{q}_o'' : 非加熱側表面からの流出熱流束 (kW/m^2)

x : 加熱面からの距離 (m)

L : 壁厚 (m)

h : 熱伝達率 ($kW/m^2 \cdot K$)

ε : 輻射伝達率 (-)

σ : ステファンボルツマン定数 $= 5.67 \times 10^{-11}$ ($kW/m^2 \cdot K^4$)

(b) 差分化

式 3.4.1 を差分に展開すると、以下の式が成り立つ。

壁体内 (加熱側から i 番目の点)

$$\rho C_w \Delta x \frac{T_{w,i}^{j+1} - T_{w,i}^j}{\Delta t} = \left(\lambda \frac{T_{w,(i-1)} - T_{w,i}}{\Delta x} - \lambda \frac{T_{w,i} - T_{w,(i+1)}}{\Delta x} \right) - \dot{q}_{v,i} \Delta x \quad (3.4.3)$$

半無限固体では表面温度がいきなり上がり、熱が裏面まで到達することもないが、本モデル上は加熱側表面、非加熱側表面での流入、流出熱流束を考える。火災加熱では輻射が卓越するため総合熱伝達率として扱わずに、対流と輻射による熱流束を分けて与え、以下の式が成り立つ。

加熱側表面

$$\rho C_w \frac{\Delta x}{2} \frac{T_{w,1}^{j+1} - T_{w,1}^j}{\Delta t} = h_i (T_f - T_{w,1}) + \varepsilon_i \sigma (T_f^4 - T_{w,1}^4) - \lambda \frac{T_{w,1} - T_{w,2}}{\Delta x} - \dot{q}_{v,1} \frac{\Delta x}{2} \quad (3.4.4)$$

非加熱側表面

$$\rho C_w \frac{\Delta x}{2} \frac{T_{w,n}^{j+1} - T_{w,n}^j}{\Delta t} = \lambda \frac{T_{w,(n-1)} - T_{w,n}}{\Delta x} - h_o (T_{w,n} - T_o) - \varepsilon_o \sigma (T_{w,n}^4 - T_o^4) - \dot{q}_{v,n} \frac{\Delta x}{2} \quad (3.4.5)$$

ここに

添え字

f : 加熱側雰囲気

o : 非加熱側雰囲気

w : 壁体内部

i : 節点番号

n : 節点数

j : 時間刻み

(c) 温度を与える式

これらの式を基に、温度を与える式が得られる。

壁体内（加熱側から i 番目の点）

$$T_{w,i}^{j+1} = T_{w,i}^j + \frac{\lambda}{\rho C_w} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{w,(i-1)} - 2T_{w,i} + T_{w,(i+1)}) - \frac{\Delta t}{\rho C_w} \dot{q}_{v,i} \quad (3.3.6)$$

加熱側表面

$$T_{w,1}^{j+1} = T_{w,1}^j + \frac{2}{\rho C_w} \frac{\Delta t}{\Delta x} \left\{ h_i (T_f - T_{w,1}) + \varepsilon_i \sigma (T_f^4 - T_{w,1}^4) - \lambda \frac{T_{w,1} - T_{w,2}}{\Delta x} \right\} - \frac{\Delta t}{\rho C_w} \dot{q}_{v,1} \quad (3.3.7)$$

非加熱側表面

$$T_{w,n}^{j+1} = T_{w,n}^j + \frac{2}{\rho C_w} \frac{\Delta t}{\Delta x} \left\{ \lambda \frac{T_{w,(n-1)} - T_{w,n}}{\Delta x} - h_o (T_{w,n} - T_o) - \varepsilon_o \sigma (T_{w,n}^4 - T_o^4) \right\} - \frac{\Delta t}{\rho C_w} \dot{q}_{v,n} \quad (3.3.8)$$

(d) 水分蒸発による吸熱

温度が 100°C に達してから水分量 $W = \phi \rho$ (kg/m^3) が 0 になるまで、入射熱は水分の蒸発にのみ消費されるものとする。この時、式 3.3.1 の左辺が 0 であるから、

$$\dot{q}_v = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.3.9)$$

差分化して、壁体内（加熱側から i 番目の点）について以下の式が成り立つ。

$$\dot{q}_{v,i} = \frac{\lambda}{\Delta x^2} (T_{w,(i-1)} - 2T_{w,i} + T_{w,(i+1)}) \quad \text{ただし } W_{w,i} > 0 \quad (3.3.10)$$

加熱側表面、非加熱側表面は対流と輻射による熱の流入、流出を考え、以下の式が成り立つ。
加熱側表面

$$\dot{q}_{v,1} = \frac{2}{\Delta x} \left\{ h_i (T_f - T_{w,1}) + \varepsilon_i \sigma (T_f^4 - T_{w,1}^4) - \lambda \frac{T_{w,1} - T_{w,2}}{\Delta x} \right\} \quad \text{ただし } W_{w,1} > 0 \quad (3.3.10)$$

非加熱側表面

$$\dot{q}_{v,n} = \frac{2}{\Delta x} \left\{ \lambda \frac{T_{w,(n-1)} - T_{w,n}}{\Delta x} - h_o (T_{w,n} - T_o) - \varepsilon_o \sigma (T_{w,n}^4 - T_o^4) \right\} \quad \text{ただし } W_{w,n} > 0 \quad (3.3.11)$$

水分量については以下の式が成り立つ。

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -\frac{\dot{q}_{v,i}}{L_w} \quad (3.3.12)$$

ここに

ϕ : 部材乾燥質量に対する含水率 (kg/kg)

$W = \phi \rho$: 水分量 (kg/m^3)

L_w : 蒸発潜熱 (kJ/kg)

3.5 乾燥壁の温度上昇簡易予測モデルについて数値解析による妥当性の検証

乾燥壁の温度上昇モデルについての課題は以下の2点である。

- ・表面温度を加熱温度で近似することの妥当性の検証
- ・有限の厚さを持つ壁を半無限固体として近似することの妥当性の検証

3.5.1 表面温度を加熱温度で近似することの妥当性の検証

防火区画には遮熱性を要求されるため、一般的に熱伝導性は低く、また限られた空間で高温の気体に曝されることを考えると、加熱温度と表面温度は大差なく、両者を近似できるのではないかと考える。

そこで加熱温度を一定として与え、加熱側表面での輻射と対流による流入熱流束から表面温度の時間変化を数値計算で求め、加熱温度と表面温度の差を比較する。

また表面温度を加熱温度で近似する仮定が、加熱温度の何割までの温度上昇を簡易予測する上で有効といえるかを明らかにするため、加熱温度を変化させて数値計算を行い、加熱温度に対する各点での温度上昇の比が、ある一定の値となる温度上昇時間を比較する。

3.5.1.1 計算条件

(0) 共通条件

表 3-5-1 の物性値を持つ壁について、含水率 $\phi=0\%$ として、加熱面からの距離が 0~70mm における温度上昇を計算する。半無限固体とみなすために、70mm での温度上昇が表面温度上昇の 0.5%以下となるように留意して、壁厚を 140mm として計算を行った（以後このように壁厚を設定する場合、非加熱側境界条件を半無限固体近似する、と示す）。解析時間刻みを 1 秒として節点距離は 1mm で行った。

(a) 表面温度一定の数値計算

加熱側表面温度を 400、600、800、1000℃でそれぞれ一定とした。

(b) 加熱温度一定の数値計算

加熱温度を 400、600、800、1000℃でそれぞれ一定として、表 3-5-2 に示す熱伝達率および輻射伝達率を用いて表面温度を計算させる。

表 3-5-1 土壁の物性値

	乾燥密度 [kg/m ³]	比熱 [kJ/kg K]	熱伝導率 ×10 ⁻³ [kW/m K]
土壁	1360	0.88	0.4

表 3-5-2 環境条件

	熱伝達率[kW/m ² K]	輻射伝達率
加熱側	0.03	0.8
外気側	0.01	0.8

3.5.1.2 計算結果

(a) 表面温度と加熱温度の比較

図 3-5-1 に加熱温度一定の数値計算より得た表面温度の時間変化を記号で示す。

- ・加熱開始直後から加熱側表面の温度は急激に上昇し、加熱温度に漸近することが分かる。
- ・加熱温度 600、800、1000℃の表面温度と加熱温度の差は、加熱温度の 10%未満となっているのに対し、加熱温度 400℃の表面温度と加熱温度の差は、加熱温度との割合でみると 10%を下回るのは 35 分を過ぎてからである。

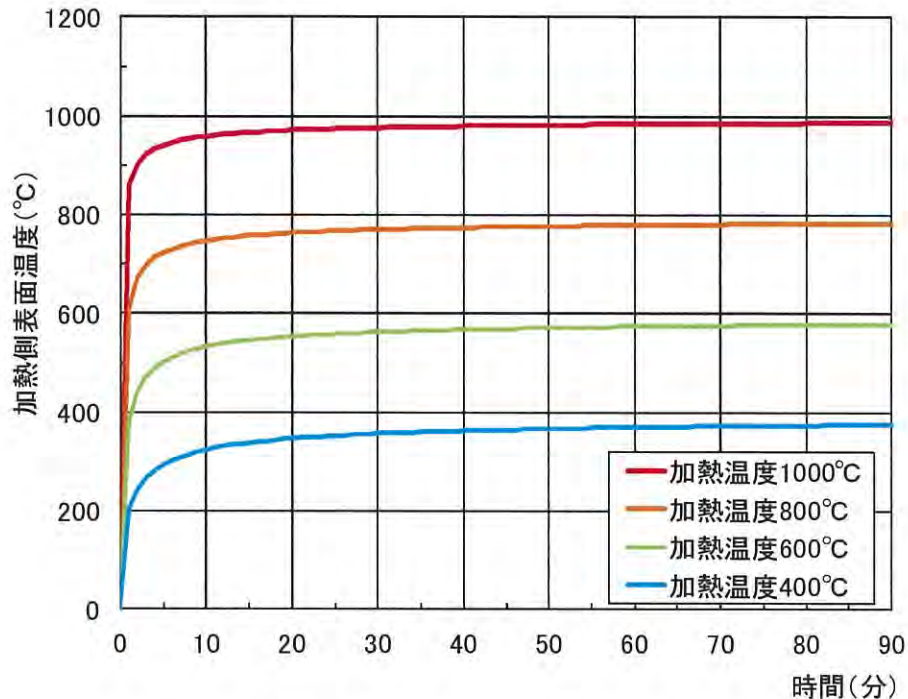


図 3-5-1 加熱側表面温度の時間変化(数値解)

(b) 表面温度と加熱温度の差が、温度上昇時間に与える影響

図 3-5-2 に、表面温度一定の条件下と加熱温度一定の条件下の数値計算から求めた、加熱温度に対する各点の温度上昇（無次元温度上昇とよぶ）の比が 0.1、0.2、0.4 となるときの乾燥壁の温度上昇時間を示す。加熱温度の違いを線の色で表わす。

- ・加熱温度が低くなるにつれ、表面温度一定の条件下より得られる温度上昇時間との差が大きくなる傾向にある。

- ・この差は、加熱側表面からの距離が変化してもおよそ一定の値をとることが分かる。

そこで、ある無次元温度上昇に達するときの時間と位置を示すフーリエ数 $1/2F_0^{1/2}$ を用いた比較を行う。

図 3-5-3 に表面温度一定の条件下から求めたフーリエ数を横軸に、加熱温度一定の条件下から求めたフーリエ数を縦軸にとり、加熱面からの距離が 40mm の位置を代表値として、無次元温度上昇が 0.1、0.2、0.4 に至るフーリエ数の比を示す。

- ・加熱温度が 1000℃のときは両者の比は限りなく 1 に近いが、加熱温度が下がるにつれて少しずつ差が大きくなり、400℃の時は約 10%の差を生じることが分かる。

- ・ただし斜線より表面温度一定の側にプロットされるというのは、表面温度を一定とみなす半無限固体近似が安全側の評価となることを意味している。

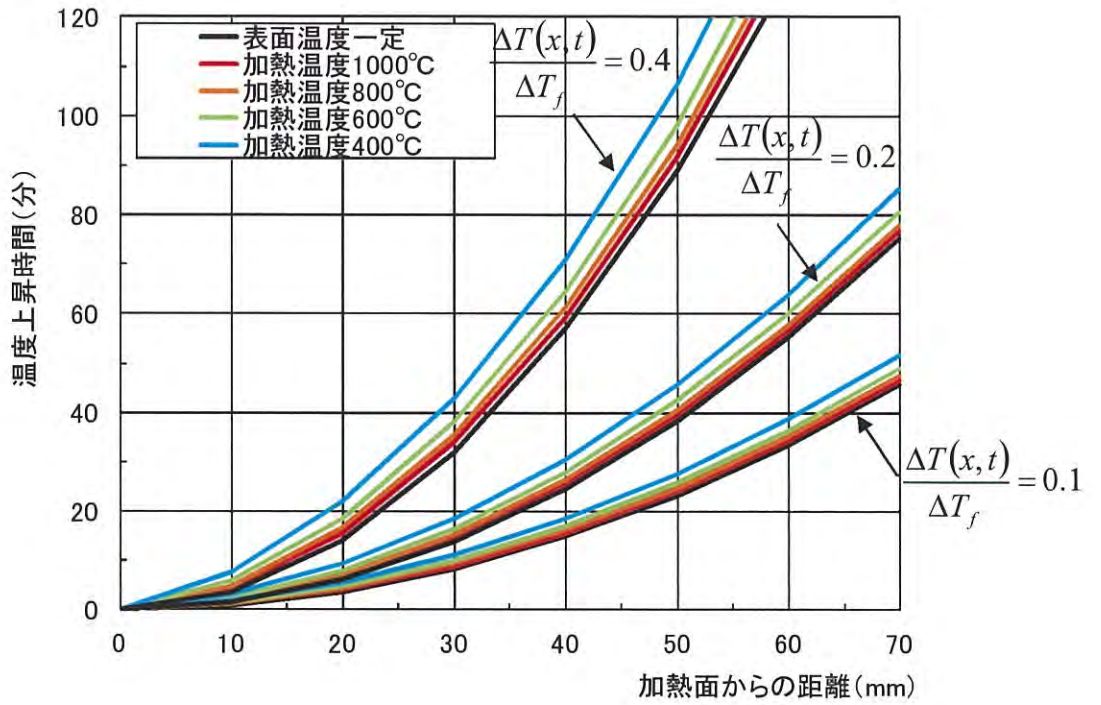


図 3-5-2 表面温度と加熱温度の差が温度上昇時間に与える影響(数値解)

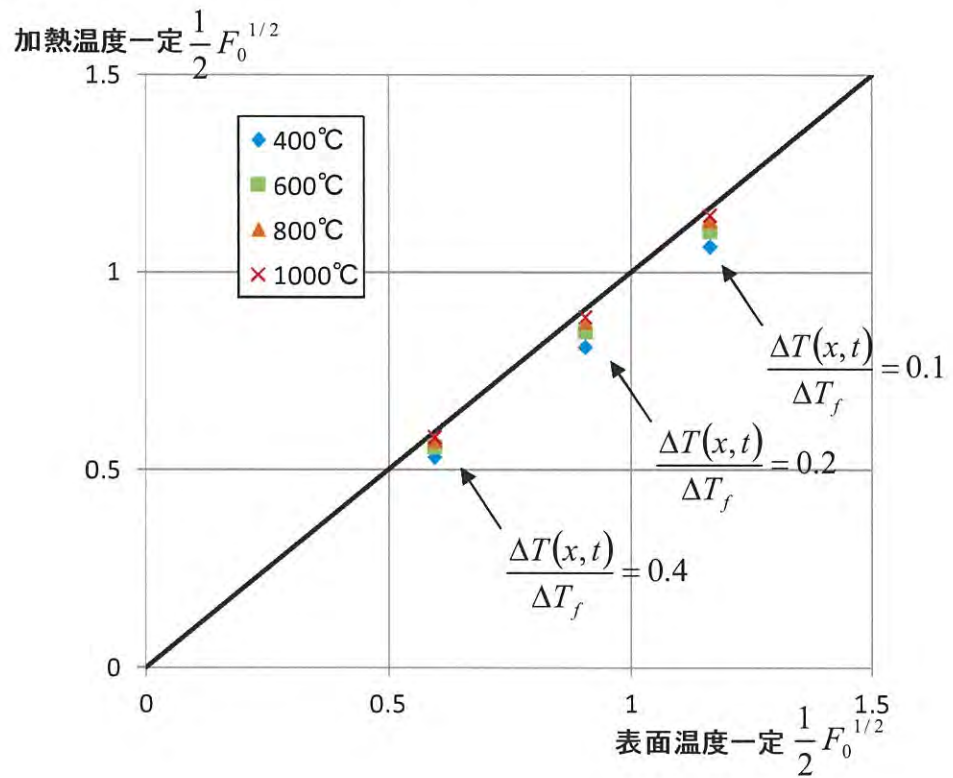


図 3-5-3 ある無次元温度上昇に達するときのフーリエ数 $\frac{1}{2} F_0^{1/2}$ の比較(数値解)

表面温度を加熱温度で近似することの妥当性を検証できたため、表面温度 T_s を加熱温度 T_f で置き換えた乾燥壁の温度簡易予測式を以下に示す。

(a) 乾燥壁の温度上昇時間を求める簡易予測式

$$t_{dw} = \left(A_n - B_n \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \leq R_n \right\} \quad (3.5.1)$$

(b) 乾燥壁の温度上昇を求める簡易予測式

$$\frac{\Delta T_{dw}(x, t)}{\Delta T_f} = \frac{1}{B_n} \left(A_n - \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \quad \left\{ L_{n-1} < \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \leq L_n \right\} \quad (3.5.2)$$

表 3-5-3 簡易予測式の係数対応表

n	A_n	B_n	適用範囲			適用範囲		
			L_{n-1}	$1/2F_0^{1/2}$	L_n	R_{n-1}	無次元温度	R_n
1	2	10	1.5	$\leq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \leq$	2.0	0	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \leq$	0.05
2	1.8	6	1.2	$\leq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \leq$	1.5	0.05	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \leq$	0.1
3	1.5	3	0.9	$\leq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \leq$	1.2	0.1	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \leq$	0.2
4	1.2	1.5	0.6	$\leq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \leq$	0.9	0.2	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \leq$	0.4
5	1	1	0	$\leq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \leq$	0.6	0.4	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \leq$	1.0

3.5.2 有限の厚さを持つ壁を半無限固体で近似することの妥当性の検証

建築空間における壁を想定した場合、有限な厚さを持つことになり、熱が裏面まで達することがないとする半無限固体の概念を、現実の意味で適用できるわけではない。しかし遮熱性を期待するような建築材料は熱伝導性が高くないため、熱伝導の観点からみたとき半無限固体として近似するのに十分な厚さをもっているとみなせるのではないかと考える。

また外気に曝される非加熱側表面では、熱損失の影響が大きくなることが予測されるが、

- ① 熱伝導が非加熱側表面まで達した以降も、壁体内においては相当時間、半無限固体としての近似が妥当性を持つと考えられる
- ② 耐火試験では非加熱側表面の温度測定について、熱電対を断熱パッドで覆うため※、熱損失が押さえられ、壁体内部と同じく半無限固体としての近似が妥当性を持つと考えられる

※その意図は、実際の建物では壁面に接して家具等が置かれることが多く、そのような熱がこもりやすく温度上昇が危険側となる状況を再現することと、温度測定が外気的环境条件に左右されないようにするためである。

そこで、非加熱側境界条件を(a)半無限固体近似した場合と、(b)非加熱側表面を断熱パッドで覆った場合、(c)外気に開放した場合について数値計算を行い、得られた温度上昇時間の差が小さいことを確認する。

また、半無限固体の温度分布は前掲したように、フーリエ数と無次元温度を用いた余誤差関数で表わせることが知られているため、上記の(b)と(c)の条件下における温度分布を数値計算で求めてこれと比較することで、半無限固体としての近似が妥当性を持つことを検証する。

3.5.2.1 計算条件

(0) 共通条件

表3-5-1の物性値を持つ壁について、含水率 $\phi=0\%$ として、加熱温度を 875°C で一定として、加熱面からの距離が $0\sim 70\text{mm}$ における温度上昇を計算する。解析時間刻みを1秒として節点距離は 1mm で行った。

(a) 半無限固体近似した場合

半無限固体とみなすために、 70mm での温度上昇が表面温度上昇の 0.5% 以下となるように留意して、壁厚を 140mm として計算を行った。

(b) 非加熱側表面を断熱パッドで覆った場合

壁厚を 70mm として、その非加熱側に表3-5-3に示す断熱パッドの層を重ねた複層壁について計算を行った。

(c) 非加熱側表面を外気に開放した場合

壁厚を 70mm として、表3-5-4に示す環境条件を用いて外気温度を 20°C として計算を行った。

表 3-5-1 土壁の物性値

	乾燥密度 [kg/m^3]	比熱 [$\text{kJ}/\text{kg K}$]	熱伝導率 $\times 10^{-3}$ [$\text{kW}/\text{m K}$]
土壁	1360	0.88	0.4

表 3-5-4 断熱パッドの物性値⁽²⁶⁾

厚み [mm]	含水率 [%]	乾燥密度 [kg/m^3]	比熱 [$\text{kJ}/\text{kg K}$]	熱伝導率 $\times 10^{-3}$ [$\text{kW}/\text{m K}$]
2.0	0	509	1.0	0.055

表 3-5-2 環境条件

	熱伝達率[kW/m ² K]	輻射伝達率
加熱側	0.03	0.8
外気側	0.01	0.8

3.5.2.2 計算結果

(a) 非加熱側環境条件の違いが、温度上昇時間に与える影響

図 3-5-4 に、乾燥壁の温度上昇時間（180K）について、3通りの環境条件に対する数値解の比較を示す。180K の温度上昇は耐火試験時の遮熱性の判定基準である。半無限固体近似した環境条件下における数値解を黒色の記号で、非加熱側表面を断熱パッドで覆った環境条件下における数値解を橙色の記号で、非加熱側表面を外気に開放した環境条件下における数値解を水色の記号で示す。

・加熱面からの距離が 50mm までの位置においては、乾燥壁の温度上昇時間（180K）に違いはほとんど見られないことが分かる。非加熱側境界条件が温度上昇時間に与える影響は、非加熱側表面から総厚の 2 割程度の領域に限られており、残り 8 割の壁体内においては半無限固体としての近似が妥当性を持つことを示すことができた。

・非加熱側表面位置（70mm）では、外気に開放した場合、裏面からの失熱の影響で、半無限固体近似した数値解に比べ、温度上昇時間（180K）が大きく伸びることが分かる。これに対し、断熱パッドで覆った場合は、断熱によって熱がこもり、半無限固体近似した数値解に比べ、温度上昇時間（180K）が短くなることを分かる。しかし、実際の耐火試験においては、断熱パッドの大きさが 30mm 四方と全面に対し非常に小さな部分しか覆っていないことを考えると、半無限固体近似した場合との差は、図 3-5-4 で示すよりも小さくなると考えられる。

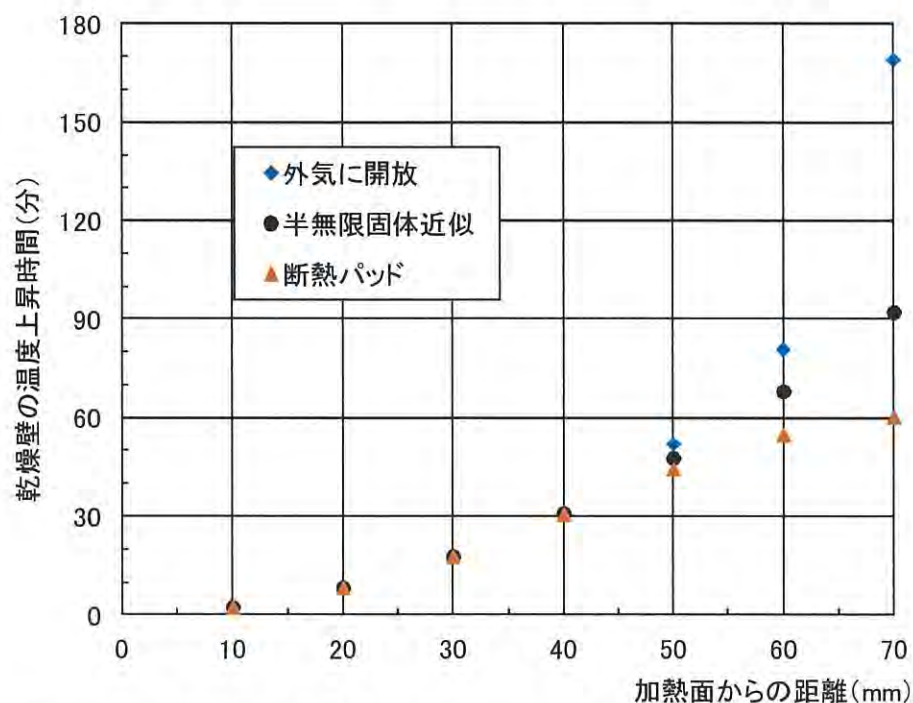


図 3-5-4 裏面における環境条件の違いが温度上昇時間に及ぼす影響

(b) 非加熱側表面を外気に開放した場合と半無限固体の温度分布の比較

図 3-5-5 に非加熱側表面を外気に開放した場合の温度分布を、縦軸に無次元温度をとり、横軸に加熱面からの距離を用いて表わし、半無限固体近似した場合の温度分布（灰色の曲線）と比較する。加熱側表面から 0、10、20、30、40、50、60、70mm（非加熱側表面）の位置における無次元温度を、①非加熱側表面温度が上昇する直前、②非加熱側表面温度上昇が 80K に到達する時間、③非加熱側表面温度上昇が 180K に到達する時間、そして④定常状態に至る時間の 4 つの時間において、記号を変えて示す。

・図 3-5-5 より、非加熱側表面の温度が上昇するにつれて、半無限固体と近似した場合の温度分布と差が生じるのが分かる。

・また、非加熱側表面を外気に開放した場合は、非加熱側表面の温度上昇が 180K を超えた後に定常状態に至り、温度分布が同じ所に収束するのに対し、半無限固体と近似した場合は温度分布が上昇を続けることが分かる。

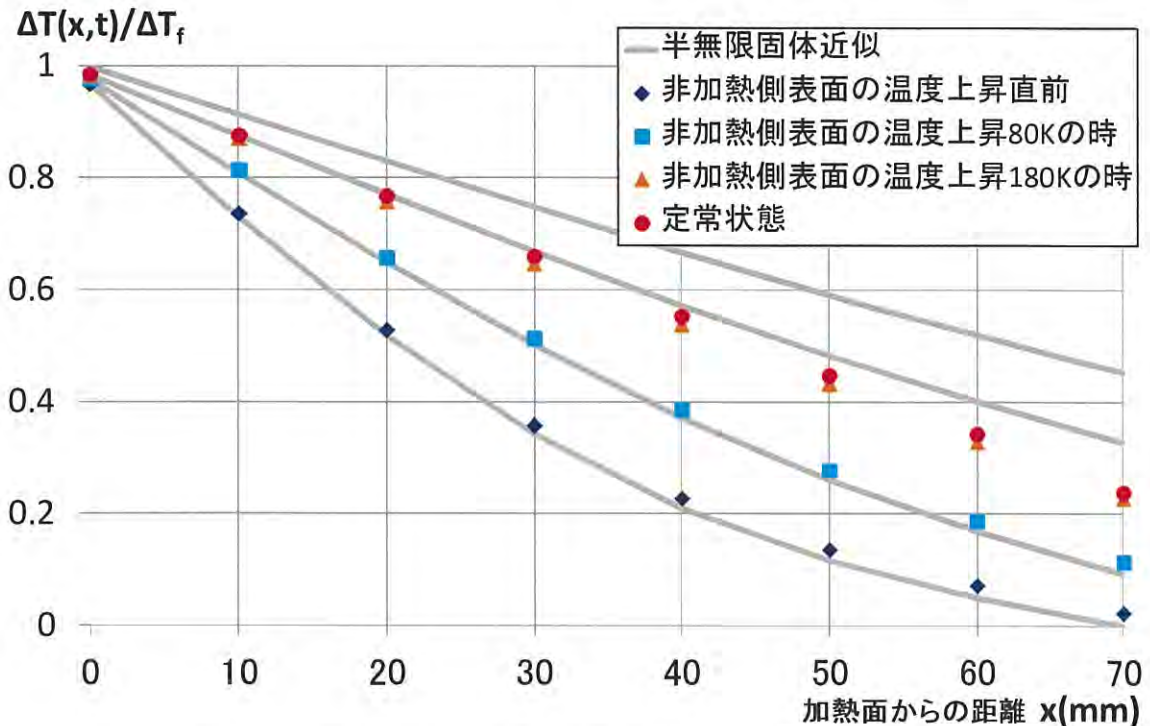


図 3-5-5 外気に開放した場合と半無限固体の温度分布比較(数値解)

非加熱側表面における条件の違いが温度上昇に与える影響を無次元数で評価するために、図 3-5-6 に、図 3-5-5 の横軸をフーリエ数により表わされる $1/2Fo^{1/2}$ に変換して示す。赤の矢印で示すのは非加熱側表面の温度上昇の推移である。

図 3-5-6 より、外気に開放するという条件下における非加熱側表面では、

- ・無次元温度上昇 $\Delta T(x, t) / \Delta T_f < 0.1$ のとき、半無限固体と見なしでも大差ないといえる。
- ・これ以上の領域では、外気への熱損失の影響で、温度上昇が半無限固体に比べて抑えられることになる。
- ・ただし、無次元温度上昇が約 0.2 に達する頃には定常状態に至り、このとき

$$\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \approx 0.5$$

すなわち、定常状態に至るときの時間は以下のように求められる。

$$t = \left(\frac{x}{\sqrt{\alpha}} \right)^2$$

・また、半無限固体と近似することで安全側の評価となるため、誤差が大きくても安全側の評価でよい場合は、常に適用可能となる。

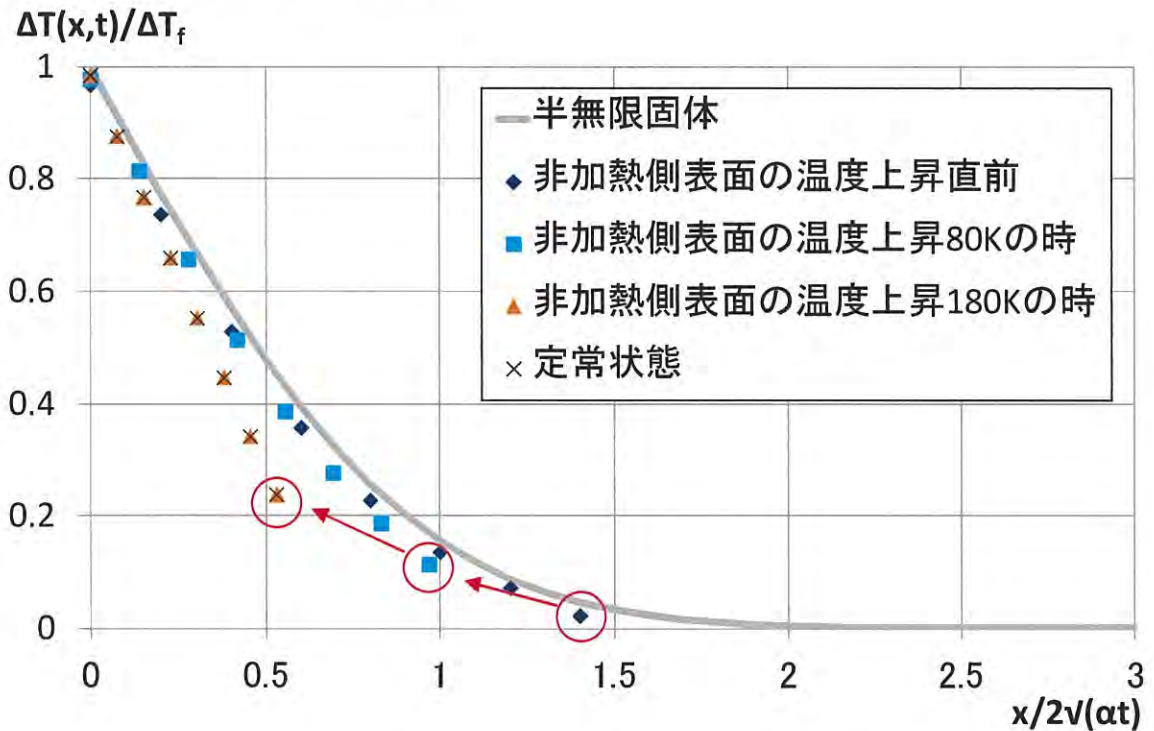


図 3-5-6 外気に開放した場合と半無限固体の無次元温度分布比較(数値解)

(c) 非加熱側表面を断熱パッドで覆った場合と半無限固体の温度分布の比較

図 3-5-7 に非加熱側表面を断熱パッドで覆った場合の温度分布を、縦軸に無次元温度をとり、横軸に加熱面からの距離を用いて表わし、半無限固体近似した場合の温度分布（灰色の曲線）と比較する。加熱側表面から 0、10、20、30、40、50、60、70mm（非加熱側表面）の位置における無次元温度を、①非加熱側表面温度が上昇する直前、②非加熱側表面温度上昇が 80K に到達する時間、③非加熱側表面温度上昇が 180K に到達する時間、そして④非加熱側表面温度上昇が 280K に到達する時間の 4 つの時間において、記号を変えて示す。

・図 3-5-7 より、非加熱側表面の温度が上昇するにつれて、半無限固体と近似した場合の温度分布と差が生じるのが分かる。

・外気に開放する場合とは逆に、半無限固体と近似した場合より温度上昇が促進していくのが分かる。

・しかし、その影響は壁体内部では小さく、また非加熱側表面を外気に開放した場合よりも高い、180K の温度上昇までは半無限固体近似としても大差ないといえる。

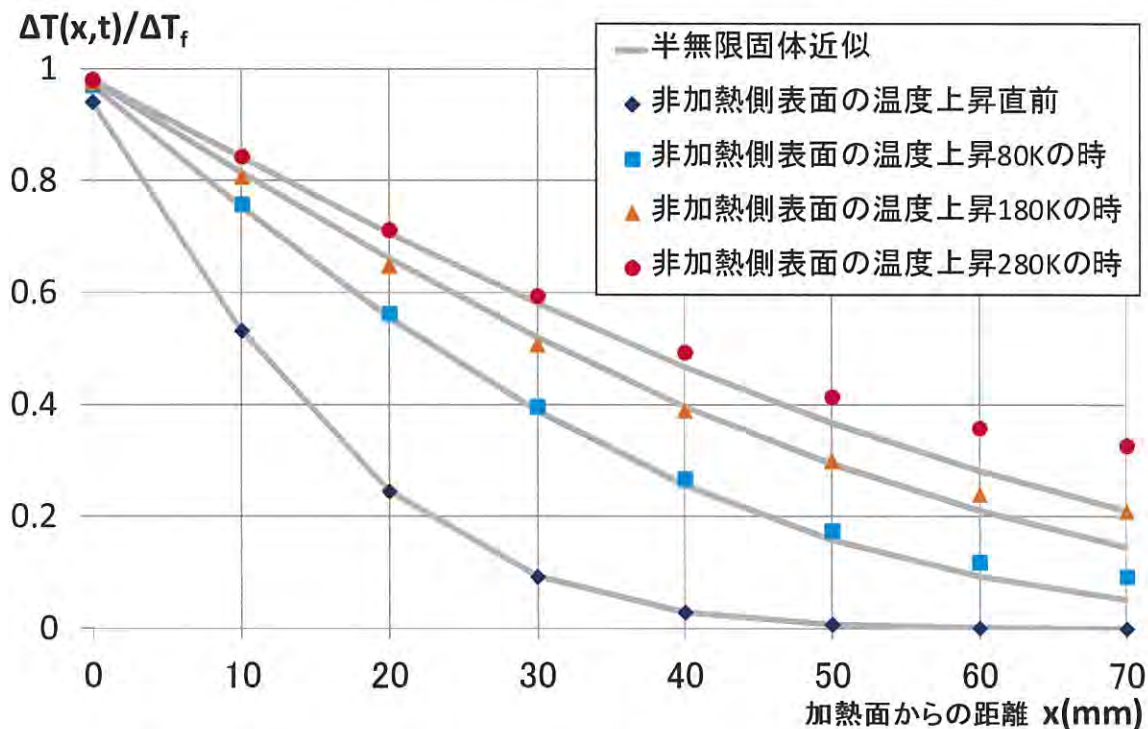


図 3-5-7 断熱パッドで覆った場合と半無限固体の温度分布比較(数値解)

これも無次元数で評価するため、図 3-5-8 に、図 3-5-7 の横軸をフーリエ数により表わされる $1/2Fo^{1/2}$ に変換して示す。赤の矢印で示すのは非加熱側表面の温度上昇の推移である。

図 3-5-8 より、断熱パッドで覆う条件下における非加熱側表面では、

・無次元温度上昇 $\Delta T(x, t) / \Delta T_f < 0.2$ のとき、半無限固体と見なしでも大差ないといえる。
 ・これ以上の領域では、蓄熱の影響で、温度上昇が半無限固体に比べて大きくなり、危険側の評価となってしまう。

・ただし、実際の耐火試験においては、断熱パッドの大きさが 30mm 四方と全面に対し非常に小さな部分しか覆っていないことを考えると、半無限固体との差は、図 3-5-5 で示すよりも小さくとなると考えられる。

・また内部の点についてはこの限りではなく、例として60mmの位置では無次元温度上昇が0.4に至る時点でも、半無限固体とみなして大差ないといえる。

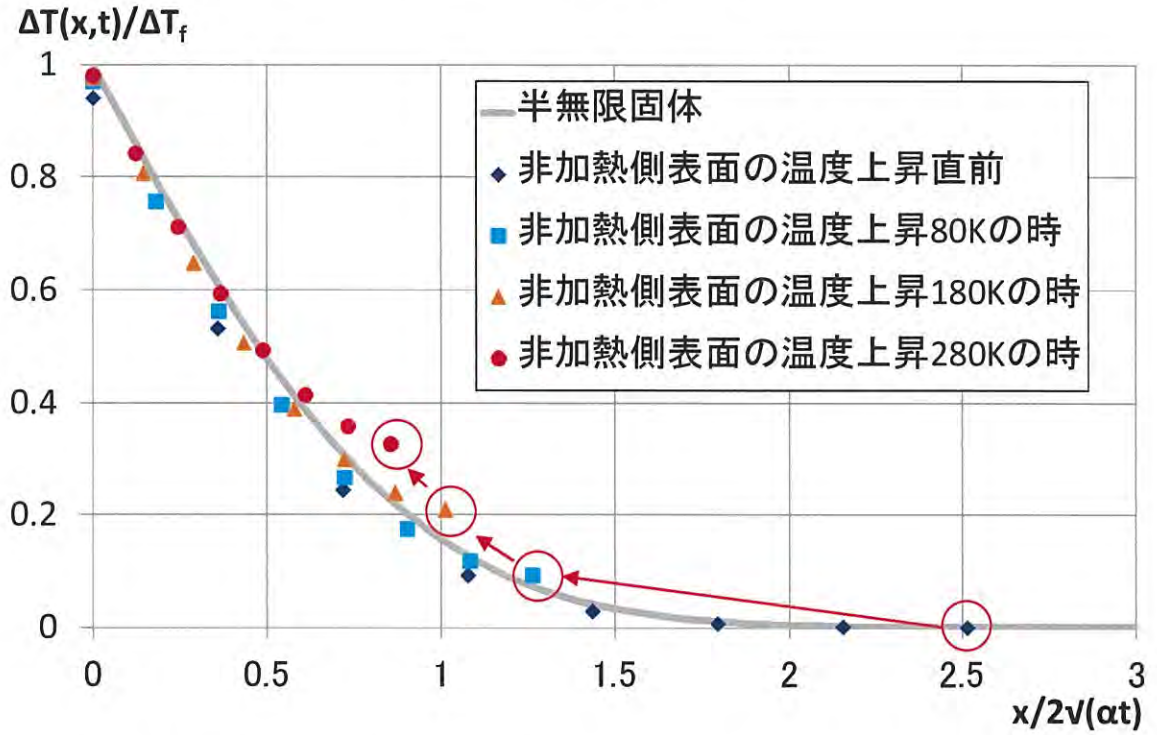


図 3-5-8 断熱パッドで覆った場合と半無限固体の無次元温度分布比較 (数値解)

3.6 水分蒸発の簡易予測モデルについて数値解析による妥当性の検証

水分蒸発モデルについての課題は以下の2点である。

- ・ 蒸発時間は含水率 ϕ と加熱面からの距離 x の二乗に比例することの確認
- ・ 蒸発時間の算定に必要な比例定数 D の算出

3.6.1 簡易予測モデルに合わせた節点距離の算定

まず、本研究で提案した水分蒸発の簡易予測モデルに合わせて、水分の蒸発がある時間にはある1点でのみ起こっていると仮定するために最適な、数値解析モデルの節点距離と解析時間刻みについて考察を行う。

そこで温度上昇の時間変化を数値計算で求め、節点距離を無限に小さくすれば温度停滞が起らないことを検証する。

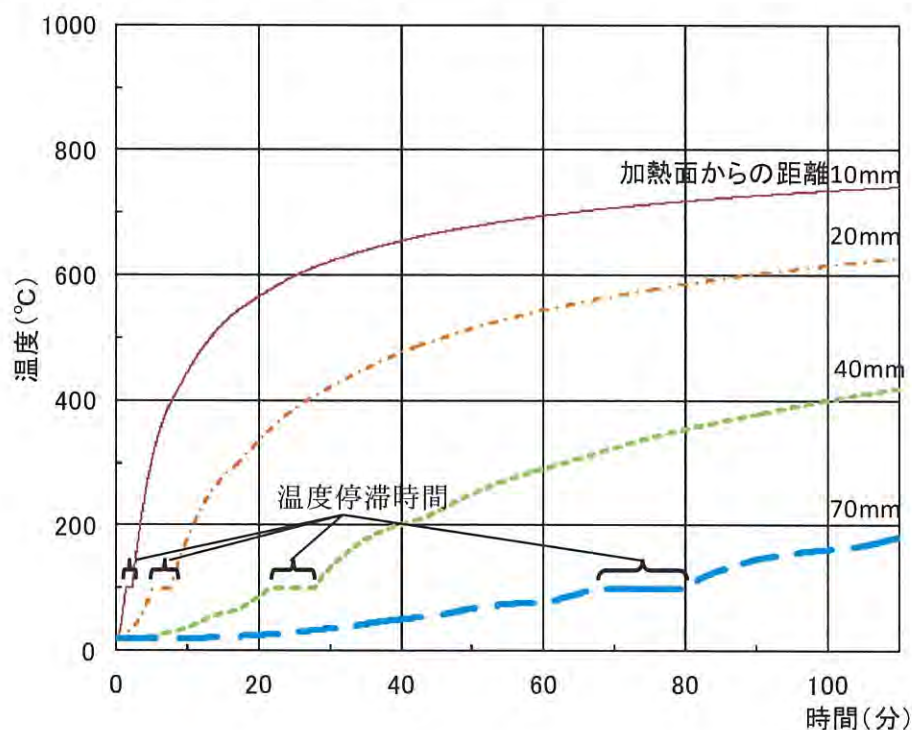
3.6.1.1 計算条件

表3-5-1の物性値を持つ壁について、加熱温度を875℃で一定、含水率を3.75%、蒸発温度を100℃として、加熱面からの距離が0～70mmにおける温度上昇を計算する。加熱側表面の環境条件は表3-5-2を用い、非加熱側境界条件は半無限固体近似する。解析時間刻みを1秒として壁体内の節点距離を10、5、2.5、1.25mmと変化させた。

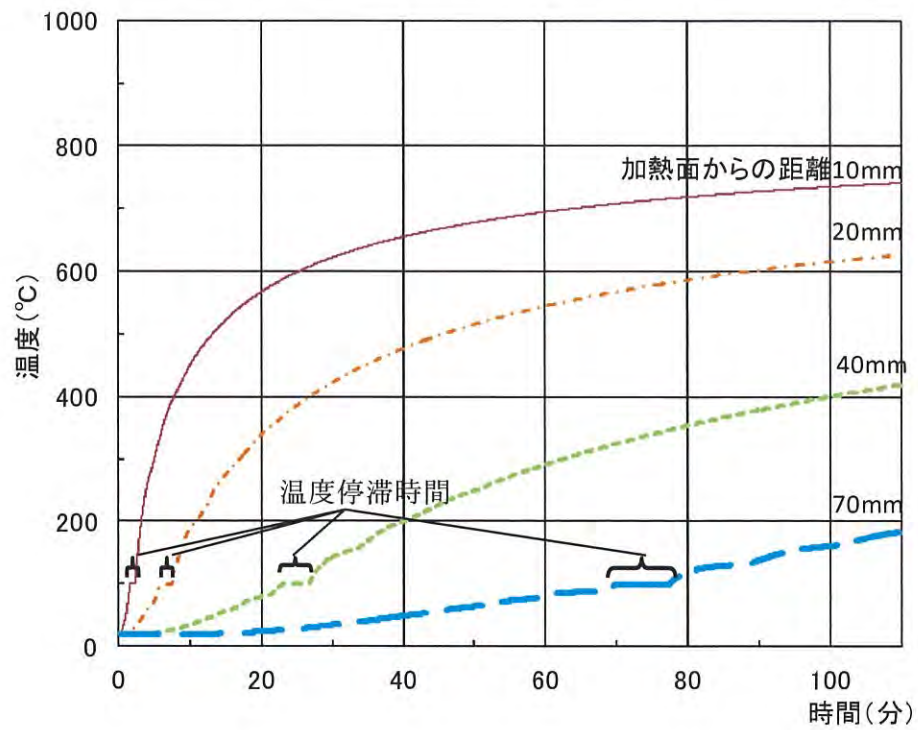
3.6.1.2 計算結果

図3-6-1(a)～(d)に、壁体内の節点距離を10、5、2.5、1.25mmと変化させた時の、加熱面からの距離10、20、40、70mmにおける温度上昇の時間変化を示す。

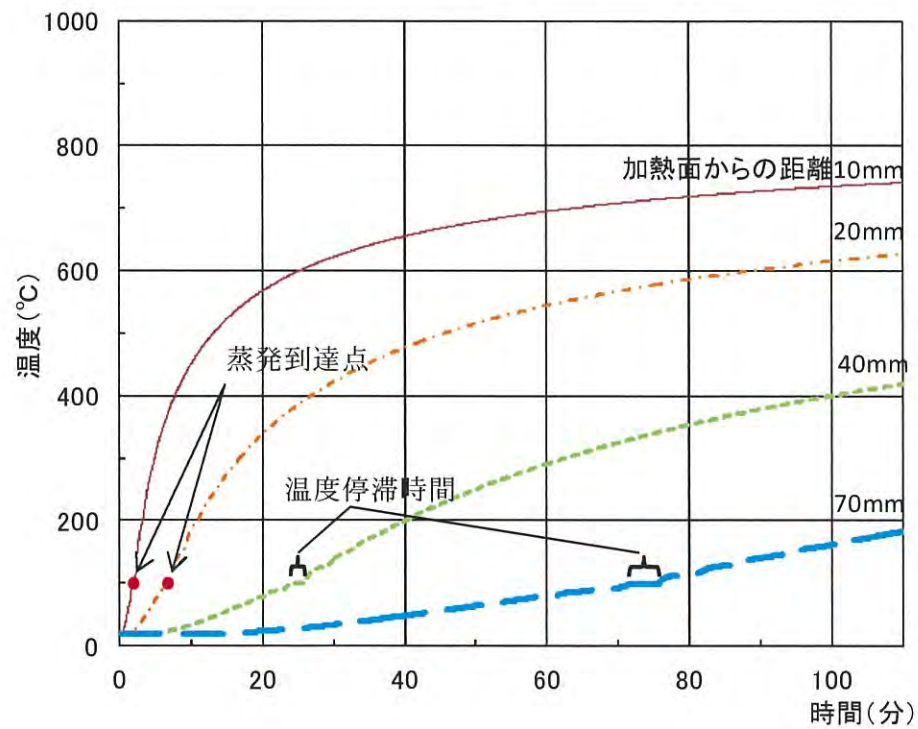
・ 節点距離 Δx を十分に小さくすれば温度停滞はなくなり、水分蒸発はある1点（蒸発到達点）でのみ起きていると考えることができることがわかった。



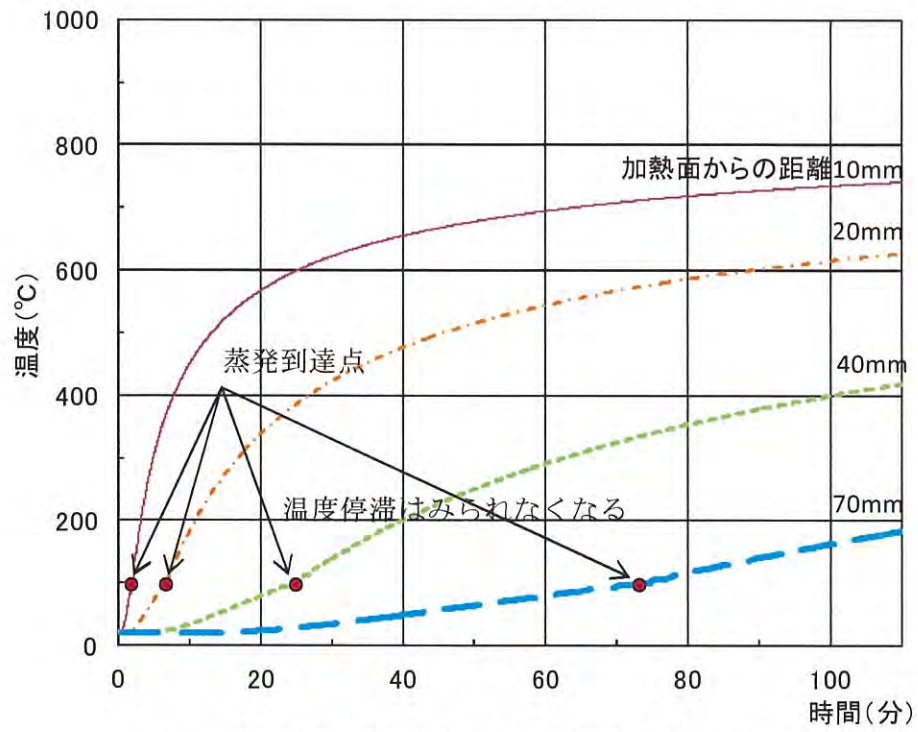
(a) 温度上昇の時間変化（節点距離 $\Delta x=10$ ）



(b) 温度上昇の時間変化 (節点距離 $\Delta x=5$)



(c) 温度上昇の時間変化 (節点距離 $\Delta x=2.5$)



(d) 温度上昇の時間変化 (節点距離 $\Delta x=1.25$)

図 3-6-1 温度停滞時間に対する節点距離の影響 ($\phi=3.75\%$)

図3-6-2に節点距離を1.25mmとしたときの、加熱面から40mmの位置における温度上昇を乾燥壁の温度上昇と比較して示す。

・水分蒸発はある1点（蒸発到達点）でのみ起きていると考えた場合の水分蒸発の影響は、温度停滞としてではなく、水分蒸発完了前までの温度上昇速度が乾燥壁に比較して遅くなることで表現されることが分かる。すなわちこの時間遅れが、蒸発到達点の動きを予測することで求めることができると推定した蒸発時間 t_v である。

・また、水分蒸発完了後の温度上昇速度は、乾燥壁の100℃到達後の温度上昇速度に比べ、ほとんど変化しないことが分かる。

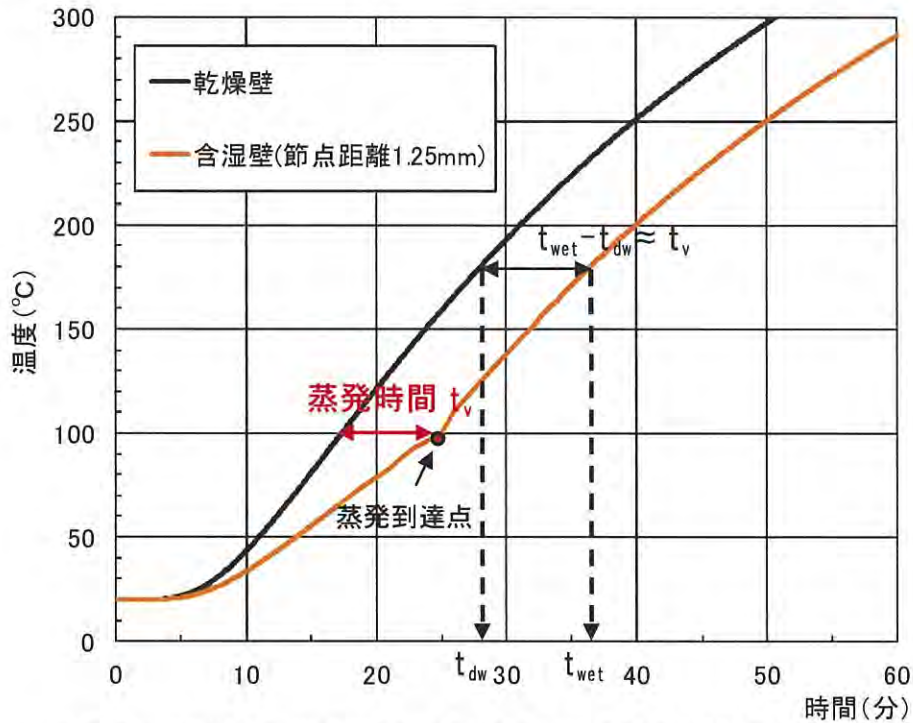


図3-6-2 乾燥壁と含湿壁($\phi=3.75\%$)の温度上昇の時間変化の比較

これより、水分蒸発完了後の含湿壁の温度上昇時間 t_{wet} は、温度停滞時間 t_{sig} ではなく蒸発時間 t_v を、乾燥壁の温度上昇時間 t_{dw} に足し合わせることで求めることができると考える。

$$t_{wet} = t_{dw} + t_v \quad \{T(x, t) \geq T_v\} \quad (3.6.1)$$

また、水分蒸発完了後の含湿壁の温度上昇について求めたい場合は、乾燥壁の温度上昇を求める簡易予測式(式3.5.2)に現れる時間 t に対し、蒸発時間を差し引いた $t - t_v$ を代入することで求めることができると考える。

$$\frac{\Delta T_{wet}(x, t)}{\Delta T_f} = \frac{1}{B_n} \left(A_n - \frac{x}{2\sqrt{\alpha(t - t_v)}} \right) \quad \left\{ L_{n-1} < \frac{x}{2\sqrt{\alpha(t - t_v)}} \leq L_n \right\} \quad (3.6.2)$$

3.6.2 蒸発時間の簡易予測式について妥当性の検証

先に蒸発時間は式 3.3.7 で求めることができると推定した。これによると、蒸発時間は含水率と加熱面からの距離の二乗に比例すると考えられた。

$$t_v = \frac{4.9 \times 10^3}{D} \left(\frac{\phi}{C_w(T_f - T_v)} \right) \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \quad (3.3.7)$$

そこで含湿壁と乾燥壁の温度上昇時間を数値計算で求め、この差から求めた蒸発時間が、含水率と加熱面からの距離の二乗に比例することを確認して、蒸発時刻の簡易予測式の妥当性を検証する。

3.6.2.1 計算条件

表 3-5-1 の物性値を持つ壁について、加熱温度を 875℃ で一定として、加熱面からの距離が 0 ～ 70mm における温度上昇を数値計算により求める。加熱側表面の環境条件は表 3-5-2 を用い、非加熱側境界条件は半無限固体近似とした。解析時間刻みを 1 秒として節点距離は 1mm で行った。

含水率を 3.75、7.5、15.0% としたとき、蒸発温度に達するときの含湿壁の温度上昇時間 (80K) を求め、それから含水率を 0% としたときの乾燥壁の温度上昇時間 (80K) を差し引いて、蒸発時間を求める。そして蒸発時間と含水率および加熱面からの距離の関係について考察を行う。

3.6.2.2 計算結果

図 3-6-3 に数値計算により求めた蒸発時間と、含水率および加熱面からの距離の関係を示す。数値解を記号で示し、これが含水率および加熱面からの距離の二乗に比例すると仮定して導いた回帰式 (式 3.6.4～7) を点線で示す。

$$t_v = 7.3 \times 10^6 \cdot \phi \cdot x^2 \quad (\phi = 30.0\%) \quad (3.6.4)$$

$$t_v = 7.6 \times 10^6 \cdot \phi \cdot x^2 \quad (\phi = 15.0\%) \quad (3.6.5)$$

$$t_v = 8.1 \times 10^6 \cdot \phi \cdot x^2 \quad (\phi = 7.5\%) \quad (3.6.6)$$

$$t_v = 8.4 \times 10^6 \cdot \phi \cdot x^2 \quad (\phi = 3.75\%) \quad (3.6.7)$$

- ・ 蒸発時間は確かに加熱面からの距離の二乗に比例することが分かった。
- ・ 蒸発時間と含水率の関係について、回帰式の係数に着目すると含水率に比例して 1 割程度変化しているものの、概ね比例関係にあるといえる。

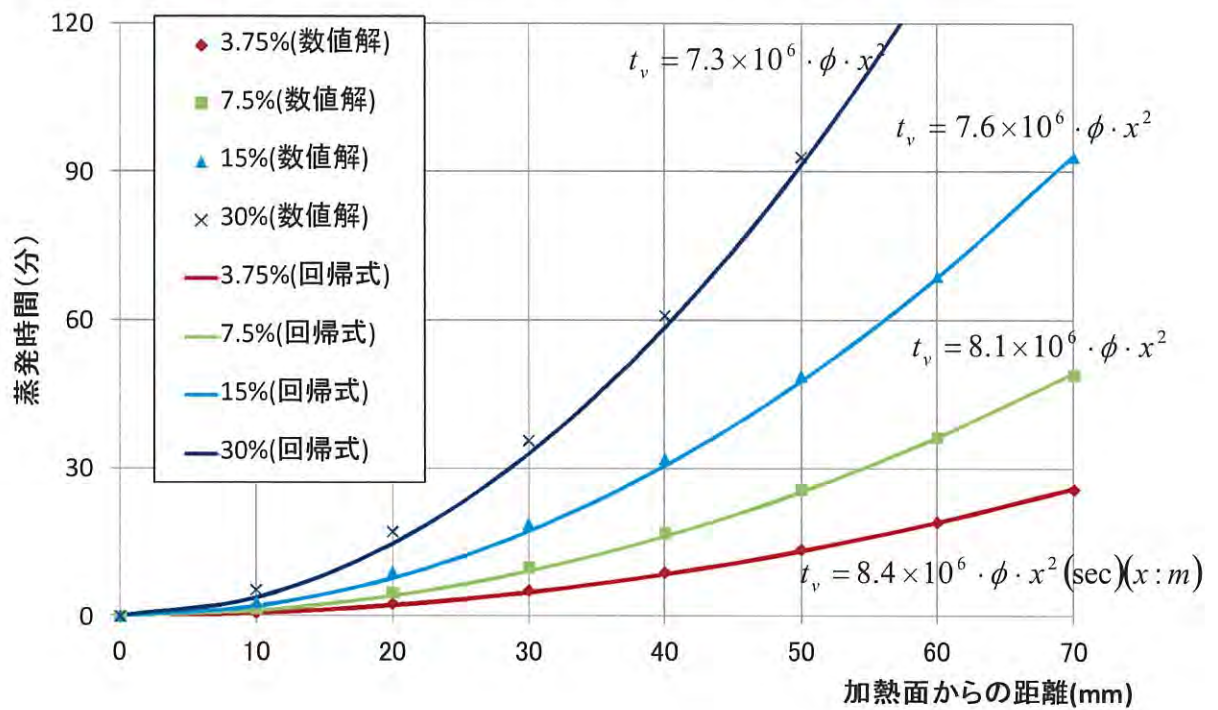


図 3-6-3 蒸発時間と加熱面からの距離の関係(数値解)

3.6.3 比例定数 D の算出

蒸発時間の簡易予測式について妥当性を示すことが出来たが、蒸発時間を実践的に求めるには比例定数 D を算出する必要がある。

そこで先に数値計算で求めた蒸発時間と、蒸発時間の簡易予測式を比較することで、比例定数 D を数値計算より推定する。

表 3-5-1 の物性値を持つ壁について、加熱温度を 875℃ で一定としたときの蒸発時間を簡易予測式で求める。

$$\begin{aligned}
 t_v &= \frac{4.9 \times 10^3}{D} \left(\frac{\phi}{C_w(T_f - T_v)} \right) \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \\
 &= \frac{4.9 \times 10^3}{D} \left(\frac{\phi}{0.88 \times 775} \right) \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{0.33 \times 10^{-6}}} \right)^2 = \frac{1}{D} \times 5.4 \times 10^6 \phi x^2 (\text{sec})(x:m)
 \end{aligned}
 \tag{3.6.8}$$

式 3. 6. 8 と数値解より得た回帰式 3. 6. 4～7 をもとに、比例定数 D を算出すると、以下のようになる。

$$D = 0.74 \quad (\phi = 30.0\%)$$

$$D = 0.71 \quad (\phi = 15.0\%)$$

$$D = 0.67 \quad (\phi = 7.5\%)$$

$$D = 0.64 \quad (\phi = 3.75\%)$$

図 3-6-4 に比例定数と含水率の関係を示す。図 3-6-4 に示す近似曲線を用いて、比例定数 D は次のように表わされる。

$$D = 0.049 \log_e \phi + 0.8 \quad (3. 6. 9)$$

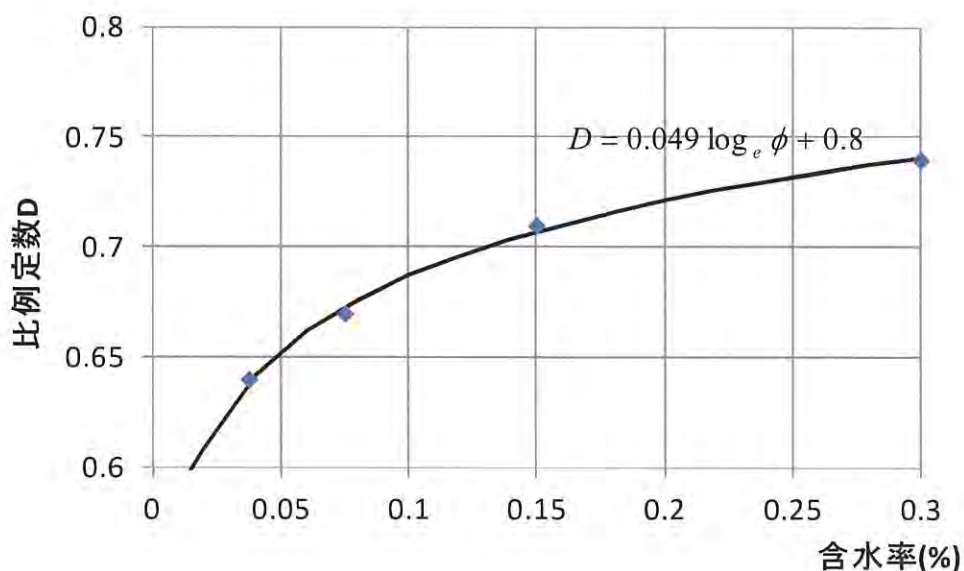


図 3-6-4 比例定数と含水率の関係(数値解)

実際に実験で用いた土壁の含水率は 3. 4～4. 2% と狭い範囲に収まっており、霧吹きで表面が滲むまで水分を含浸させたものでも 7. 5% であった。そこで土壁に対して実際に考えられる範囲内では比例定数 D は一定であると考え、比例定数 $D \approx 0. 64$ と推定した。

3.6.4 含湿壁の温度上昇時間について妥当性の検証

含湿壁の温度上昇時間 t_{wet} は、乾燥壁の温度上昇時間 t_{dw} と、蒸発時間 t_v を足し合わせることで表わすことができると考えた。

$$t_{wet} = t_{dw} + t_v \quad \{T(x, t) \geq T_v\} \quad (3.6.10)$$

これに乾燥壁の温度上昇時間の簡易予測式 3.2.11 と蒸発時間の簡易予測式 3.3.7 を代入して、以下のように表わされる。

$$t_{wet} = \left(A_n - B_n \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 + \frac{4.9 \times 10^3}{D} \left\{ \frac{\phi}{C_w(T_f - T_v)} \right\} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \quad R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \leq R_n \quad (3.6.11)$$

表 3-2-3 簡易予測式の係数対応表

n	A_n	B_n	適用範囲		
			R_{n-1}	無次元温度	R_n
1	2	10	0	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{fs}} \leq$	0.05
2	1.8	6	0.05	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{fs}} \leq$	0.1
3	1.5	3	0.1	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{fs}} \leq$	0.2
4	1.2	1.5	0.2	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{fs}} \leq$	0.4
5	1	1	0.4	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{fs}} \leq$	1.0

そこで含湿壁の温度上昇時間について簡易予測式と数値解との比較を行い、簡易予測式の妥当性を検証する。

3.6.4.1 計算条件

(0) 共通の計算条件

表 3-5-1 の物性値を持つ壁について、含水率を 3.75、7.5% の 2 通りを考える。加熱温度を 875℃ で一定としたとき、加熱面からの距離が 0～70mm における含湿壁の温度上昇時間（80K、180K）を求める。

(a) 数値解析の計算条件

加熱側表面の環境条件は表 3-3-2 を用い、非加熱側境界条件は半無限固体近似とした。解析時間刻みを 1 秒として節点距離は 1mm で行った。

(b) 簡易予測式の計算条件

数値解より推定した比例定数 $D=0.64$ ($\phi=3.75\%$)、 0.67 ($\phi=7.5\%$) を用いる。

3.6.4.2 計算結果

含湿壁の温度上昇時間の簡易予測式に上記の条件を与えると以下のように表わされ、含湿壁の温度上昇時間は加熱面からの距離の二乗に比例すると予測される。

含水率 $\phi = 3.75\%$ の時を例に示す。

温度上昇 $\Delta T(x, t) = 80\text{K}$ のとき

$$t_{wet} = \left(1.8 - 6 \frac{80}{855}\right)^{-2} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{0.33 \times 10^{-6}}}\right)^2 + \frac{4.9 \times 10^3}{0.64} \left\{ \frac{0.0375}{0.88(875-100)} \right\} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{0.33 \times 10^{-6}}}\right)^2$$

$$= 0.49 \times 10^6 x^2 + 0.32 \times 10^6 x^2 = 0.81x^2 \quad (3.6.12)$$

温度上昇 $\Delta T(x, t) = 180\text{K}$ のとき

$$t_{wet} = \left(1.2 - 1.5 \frac{180}{855}\right)^{-2} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{0.33 \times 10^{-6}}}\right)^2 + \frac{4.9 \times 10^3}{0.64} \left\{ \frac{0.0375}{0.88(875-100)} \right\} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{0.33 \times 10^{-6}}}\right)^2$$

$$= 0.97 \times 10^6 x^2 + 0.32 \times 10^6 x^2 = 1.29x^2 \quad (3.6.13)$$

図 3-6-5、3-6-6 に、含湿壁の温度上昇時間（80K、180K）と含水率および加熱面からの距離の関係を示す。数値解を記号で示し、簡易予測式を点線で示す。

- ・含湿壁の温度上昇時間は、加熱面からの距離の二乗に比例することが確認できた。
- ・簡易予測式の方が含湿壁の温度上昇時間をわずかに短く見積もる傾向にある。これは加熱温度を表面温度と近似していることが原因とみられる。
- ・含水率（3.75%と7.5%）を変化させても、数値解と簡易予測式は良い一致を見せることから、含水率が限られた範囲内では比例定数 D を一定値で近似することの妥当性が示せた。
- ・また求めたい温度上昇（80K と 180K）を変化させても、数値解と簡易予測式は良い一致を見せており、含湿壁の温度上昇時間についての簡易予測式の妥当性を示すことができた。

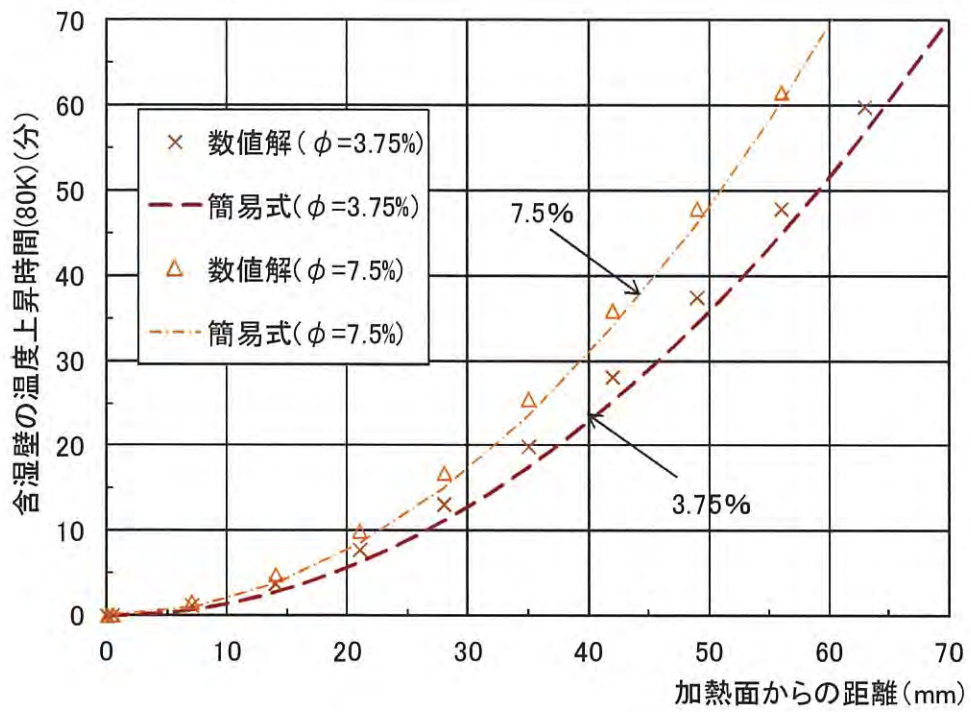


図 3-6-5 含湿壁の温度上昇時間(80K、 $\phi=3.75$ 、7.5%)
数値解と簡易予測式の比較

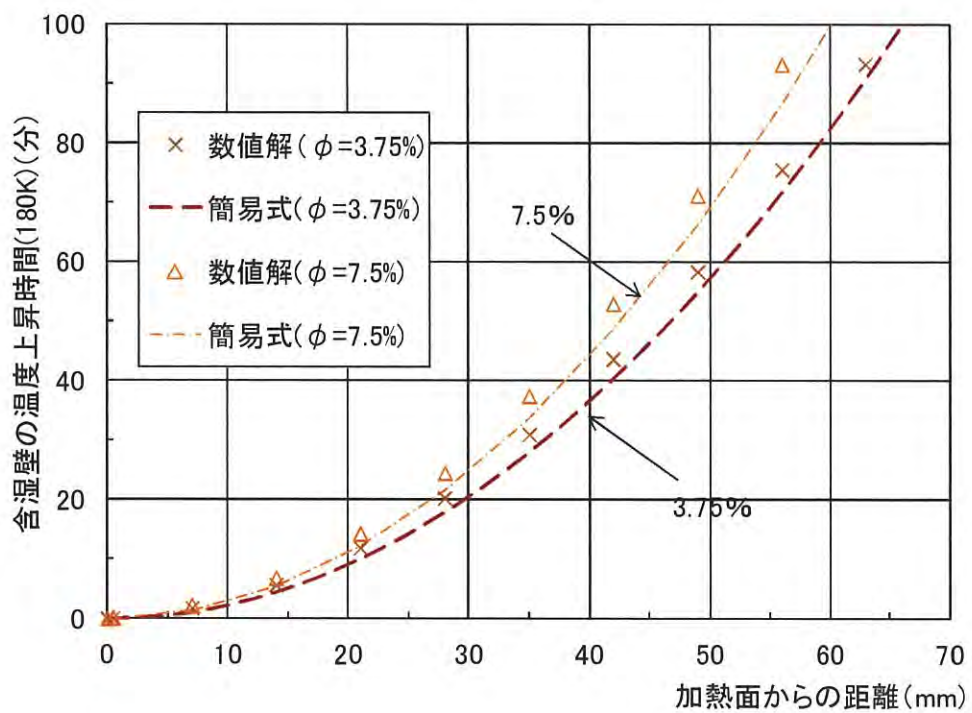


図 3-6-6 含湿壁の温度上昇時間(180K、 $\phi=3.75$ 、7.5%)
数値解と簡易予測式の比較

3.7 簡易予測モデルの適用範囲

3.7.1 温度上昇モデルの適用範囲

(a) 先に表面温度の温度上昇は20分時ではほぼ定常状態に至ることから、このときの加熱温度との差が10%未満であることを、表面温度を加熱温度で近似することの適用条件と考えた。この条件を満たす加熱温度の適用範囲について、一般的に求める方法を考える。

半無限固体の温度 T_f の流体から熱伝達を受ける場合に対する熱伝導理論解は、以下の初期条件および境界条件を与えることで

初期条件および境界条件

$$\left. \begin{aligned} T &= T_0 & (t=0, 0 \leq x < \infty) \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} &= h(T_f - T) & (0 \leq t < \infty, x=0) \\ T &= T_0 & (0 \leq t < \infty, x=\infty) \end{aligned} \right\} \quad (3.7.1)$$

λ : 熱伝導率 (kW/mK) h : 総合熱伝達率 (kW/m^2K)

以下のように与えられることが知られている⁽⁹⁾。

$$\frac{T(x,t) - T_0}{T_f - T_0} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) - \exp\left\{\frac{h}{\lambda}x + \left(\frac{h}{\lambda}\sqrt{\alpha t}\right)^2\right\} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + \frac{h}{\lambda}\sqrt{\alpha t}\right) \quad (3.7.2)$$

ここで、 $x=0$ とおけば表面温度 $T_s(t)$ を与える式が得られる。

$$\frac{T_s(t) - T_0}{T_f - T_0} = 1 - \exp\left(\frac{h}{\lambda}\sqrt{\alpha t}\right)^2 \operatorname{erfc}\left(\frac{h}{\lambda}\sqrt{\alpha t}\right) \quad (3.7.3)$$

ここで、加熱温度と表面温度の差が10%以下となる場合、加熱温度を表面温度と近似しても大差ないを考える。

$$1 - \exp\left(\frac{h}{\lambda}\sqrt{\alpha t}\right)^2 \operatorname{erfc}\left(\frac{h}{\lambda}\sqrt{\alpha t}\right) \geq 0.9 \quad (3.7.4)$$

簡単のため、

$$v = \frac{h}{\lambda}\sqrt{\alpha t} \quad (3.7.5)$$

とおくと、表面温度の無次元温度上昇 $y = 1 - \exp(v^2)\operatorname{erfc}(v)$ は、図3.7.1で示される。

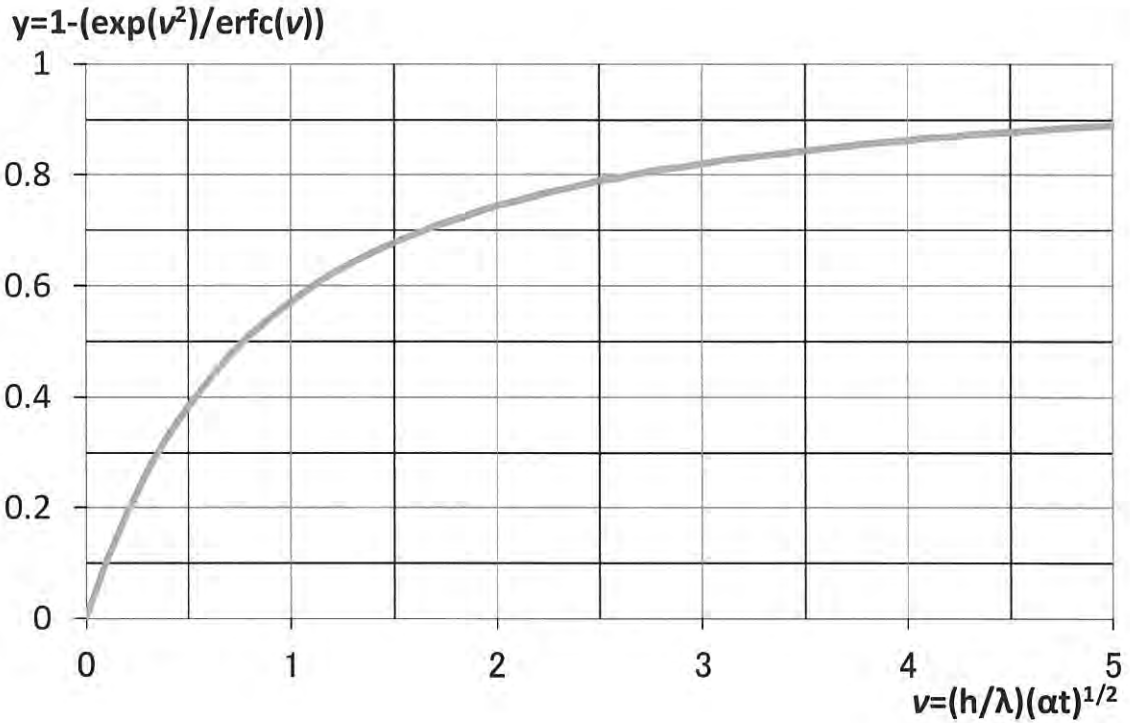


図 3-7-1 表面温度の無次元温度上昇

ここで左辺=0.9 の値をとるのは、

$$v = \frac{h}{\lambda} \sqrt{\alpha t} \approx 5 \quad (3.7.6)$$

すなわち、表面温度の無次元温度上昇が 0.9 に達する時間 t' は以下のように表わされる。

$$t' = \frac{1}{\alpha} \left(5 \frac{\lambda}{h} \right)^2 \quad (3.7.7)$$

総合熱伝達率 h は、輻射が支配的と考えれば、

$$\begin{aligned} h &= \frac{\sigma(T_f^4 - T_s(t)^4)}{T_f - T_s(t)} \\ &= \sigma(T_f^2 + T_s(t)^2)(T_f + T_s(t)) \end{aligned} \quad (3.7.8)$$

ここで $T_s(t) \approx T_f$ と考えれば、

$$h = 4\sigma T_f^3 \quad (3.7.9)$$

上式と、 $\alpha = \lambda / \rho C_w$ 、 $\sigma = 5.67 \times 10^{-11} (kW / m^2 K^4)$ を式 3.7.7 に代入して、表面温度の無次元温度上昇が 0.9 に達する時間を求める式が得られる。

$$t' = 4.9 \times 10^{20} \cdot T_f^{-6} \cdot \lambda \rho C_w \quad (3.7.10)$$

評価対象とする時間 t_r が、表面温度の無次元温度が 0.9 に達する時間 t' に比べて十分に長ければ、加熱温度を一定とすることで失われる熱量の影響は小さくなると考えられる。

そこで評価対象とする時間 t_r に対する t' の比が 1/10 以下になることを適用条件とする。

$$\frac{t'}{t_r} \leq 0.1 \quad (3.7.11)$$

ここに

t' : 表面温度の無次元温度が 0.9 に達する時間 (s)

t_r : 評価対象とする時間 (s)

式 3.7.10 を代入すると

$$t_r \geq \frac{0.49 \times 10^{20} \cdot \lambda \rho C_w}{T_f^6} \quad (3.7.12)$$

すなわち、加熱温度が大きいほど短い時間に対する評価が可能になり、小さいほど大きい時間に対する評価しかできなくなることが分かる。

ただし表面温度を一定とした方が、加熱温度を一定とする場合に比べて常に安全側の評価となるため、誤差が大きくても安全側の評価で済む場合は上記の検討は不要である。

(b) 有限の壁を半無限固体近似する際の適用範囲について、温度分布の時間変化を半無限固体の理論解と比較することで以下のように示した。

- ・ 非加熱側表面を外気に開放した場合に半無限固体として近似できる範囲は、非加熱側表面での無次元温度上昇が 0.1 に達するまでとする。
- ・ 非加熱側表面を断熱パッドで覆った場合に半無限固体として近似できる範囲は、非加熱側表面での無次元温度上昇が 0.2 に達するまでとする。

3.7.2 水分蒸発モデルの適用範囲

蒸発時間の簡易予測式を求めるに当たり、位置 x における温度上昇過渡期の伝導熱流束について、加熱表面温度と蒸発温度 (100℃) の差を、加熱面からの距離で割った温度勾配に比例すると考え、比例定数 D を用いて次式のように表わした。

$$\dot{q}'' = D \times \lambda \frac{T_f - T_v}{x} \quad (3.3.3)$$

この比例定数 D について数値解より推定した結果、含水率が限られた範囲内では一定値と見なせることが分かり、実際に試験体に用いた 3.4～7.5% の範囲内では $D=0.69$ であると推定した。しかし、①含水率が非常に高くなると比例定数が変化することが予測されること、②また材料が異なる場合は比例定数 D も変化することが予測されるため、材料の物性値および含水率が変化する場合は、その都度数値解より推定する必要がある。

3.8 まとめ

・半無限固体の表面温度が瞬時に引き上げ保たれる場合に対する熱伝導理論解を線形近似することで、

(a) 乾燥壁の温度上昇時間を求める簡易予測式と

$$t_{dw} = \left(A_n - B_n \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \leq R_n \right\} \quad (3.5.1)$$

(b) 乾燥壁の温度上昇を求める簡易予測式を示した。

$$\frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} = \frac{1}{B_n} \left(A_n - \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \quad \left\{ L_{n-1} < \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \leq L_n \right\} \quad (3.5.2)$$

・水分蒸発がある時間にはある1点でのみ起きていると考え、乾燥壁の温度上昇に対する時間遅れを蒸発時間 t_v として定義して、蒸発時間の簡易予測式を導出した。

$$t_v = \frac{4.9 \times 10^3}{D} \left(\frac{\phi}{C_w(T_f - T_v)} \right) \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \quad (3.3.7)$$

・数値解との比較からこれらの簡易予測式の妥当性を検証し、

(a) 表面温度を加熱温度で近似できる適用範囲について、評価対象とする時間 t_r に対する t' (表面温度の無次元温度が 0.9 に達する時間) の比が 1/10 以下になることを適用条件として、以下のように示した。

$$t_r \geq \frac{0.49 \times 10^{20} \cdot \lambda \rho C_w}{T_f^6} \quad (3.7.12)$$

(b) 半無限固体として近似できる適用範囲について、非加熱側表面を外気に開放した場合については、非加熱側表面での無次元温度上昇が 0.1 に達するまで、非加熱側表面を断熱パッドで覆った場合には、非加熱側表面での無次元温度上昇が 0.2 に達するまでとした。

・含湿壁の温度上昇時間を、乾燥壁の温度上昇時間と蒸発時間を足し合わせることで表わし、数値解との比較から加熱一定の条件下における簡易予測式の妥当性を示した。

$$t_{wet} = \left(A_n - B_n \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 + \frac{4.9 \times 10^3}{D} \left\{ \frac{\phi}{C_w(T_f - T_v)} \right\} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \quad R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \leq R_n \quad (3.6.9)$$

また、以下のような課題が残されている。

・本章で提案した簡易予測式の適用条件は、加熱一定の条件下に限られている。これを標準加熱曲線による加熱条件下に適用することできれば、耐火試験結果との比較を行うことができ、非常に有益だと考えられる。

第4章 標準加熱曲線下における土壁の温度簡易予測式

前章では加熱一定の条件下における土壁の温度簡易予測式の提案を行った。温度上昇簡易予測モデルには、半無限固体の表面温度が瞬時に引き上げられ一定に保たれる場合に対する熱伝導理論解を用いており、水分蒸発モデルには、蒸発到達点への入射熱流束を、表面温度と蒸発温度（100℃）の差を加熱面からの距離で割った温度勾配に比例するとして与えている。これらの表面温度を加熱温度と近似する妥当性については、適用範囲を設けた上で検証された。

一方で、実際の区画火災における火災室内の温度推移は、火災成長率 β を用いて $\beta t^{1/6}$ で近似され、時間に応じて変化することが知られている⁽⁶⁾。このことから防火区画部材の火災安全性を評価する耐火試験での加熱条件として、 $\beta=460$ とした標準加熱曲線が用いられている。

本章ではこうした加熱条件を用いる性能設計や耐火試験時における、壁体の温度を予測する手法について、前章に示した加熱一定の条件下における理論を用いるために、時間に応じて変化する加熱温度を一定の等価加熱温度として近似する方法と、これに応じた温度簡易予測式を提案する。第2章の実験結果と第3章で示した数値解析モデルを用いて簡易予測式の検証を行う。

4.1 等価加熱温度の導入

耐火試験では加熱条件として標準加熱曲線が用いられている。しかし試験体の発熱や吸熱反応の影響で、一時的に加熱温度を標準加熱曲線で制御することが難しかった場合、試験体を受ける熱量を、加熱温度を加熱時間で積分した温度時間面積で表わし、標準加熱曲線下での温度時間面積と等しくなるように加熱温度を調整することとなっている。受熱量の調整を時間ではなく温度で調整している理由は、耐火試験では要求耐火時間での温度上昇を遮熱性として評価しているためである。本研究でもこれと同様に時間 t までの標準加熱温度曲線下の温度時間面積と等しくなるような一定の等価加熱温度 $T_{f,e}$ を用いることで、時間 t における温度上昇時間を精度よく求められないか検討する。

屋内火災および耐火試験での温度推移は次式 4.1.1 で近似することができる⁽⁶⁾。

$$T_f(t) - T_0 = \beta t^{1/6} \quad (4.1.1)$$

ここに

β : 火災成長率

t : 時間(s)

※特に $\beta=233$ (t の単位を分とするととき460), $T_0=20$ としたものが耐火試験における標準加熱曲線として用いられている。

図4-1-1に標準加熱温度曲線を灰色の線で示し、時間 t までの標準加熱温度曲線下の温度時間面積と等しくなるように求めた等価加熱温度を結んで黒色の線で示す。

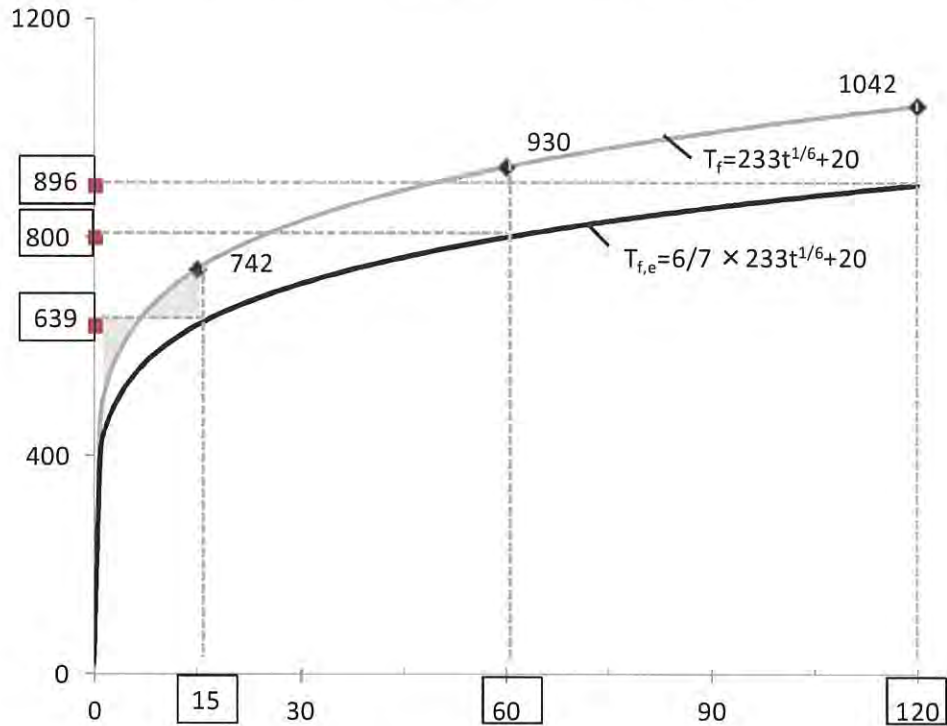


図4-1-1 等価加熱温度

このように等価加熱温度を求めるには式4.1.1の右辺を0～ t 分で積分したものを時間 t で割って平均化すればよく、

$$T_{f,e}(t) - T_0 = \left(\beta \int_0^t t^{1/6} dt \right) / t$$

すなわち次式で示すことができる。

$$T_{f,e}(t) - T_0 = \frac{6}{7} \beta t^{1/6} = \frac{6}{7} \{T_f(t) - T_0\} \quad (4.1.2)$$

4.2 乾燥壁の温度上昇時間の簡易予測式

前節で時間に応じて変化する加熱曲線を、等価加熱温度として一定にできるようになったため、本節では前章で提案した温度上昇時間と蒸発時間の簡易予測式について、等価加熱温度を用いた式に変形することを目的とする。

まず、加熱一定の条件下における乾燥壁の温度上昇時間の簡易予測式 (3. 5. 1) について、 T_f で表わされる加熱温度に等価加熱温度 $T_{f,e}(t)$ を代入することを考える。

$$t_{dw} = \left(A_n - B_n \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \leq R_n \right\} \quad (3. 5. 1)$$

等価加熱温度は時間 t によって変化する。そして、ある点が $\Delta T(x, t)$ の温度上昇に要する時間 t_{dw} を求めようとするとき時間 t が必要になる。従って等価加熱温度自体が時間 t_{dw} の関数になっている。すなわち式 4. 1. 2 で $t=t_{dw}$ として式 3. 5. 1 に代入することで、等価加熱温度を用いた乾燥壁の温度上昇時間を求める式 (4. 2. 1) が得られる。

$$t_{dw} = \left(A_n - B_n \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t_{dw})} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t_{dw})} \leq R_n \right\} \quad (4. 2. 1)$$

上式は乾燥壁の温度上昇時間 t_{dw} について陽に解くことはできない。そこで位置 x についてまとめると、時間 t_{dw} で温度上昇 $\Delta T(x, t)$ に達する x の位置については陽に解くことができる。

$$x = 2\sqrt{\alpha} \left(A_n - B_n \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t_{dw})} \right) \cdot t_{dw}^{1/2} \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t_{dw})} \leq R_n \right\} \quad (4. 2. 2)$$

式 4. 2. 2 を利用して、間接的ではあるが、乾燥壁の温度上昇時間と加熱面からの距離の関係を求めることができる。

ここに

$$A_n, B_n \text{ は、 } R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t)} \leq R_n \text{ の適用範囲に応じて変化する係数 (表4-2-1参照)}$$

$$\Delta T_{f,e}(t) = T_{f,e}(t) - T_0$$

表 4-2-1 簡易予測式の係数対応表

n	A_n	B_n	適用範囲		
			R_{n-1}	温度上昇比	R_n
1	2	10	0	$\leq \frac{\Delta T(t,x)}{\Delta T_{f,e}(t_{dw})} \leq$	0.05
2	1.8	6	0.05	$\leq \frac{\Delta T(t,x)}{\Delta T_{f,e}(t_{dw})} \leq$	0.1
3	1.5	3	0.1	$\leq \frac{\Delta T(t,x)}{\Delta T_{f,e}(t_{dw})} \leq$	0.2
4	1.2	1.5	0.2	$\leq \frac{\Delta T(t,x)}{\Delta T_{f,e}(t_{dw})} \leq$	0.4
5	1	1	0.4	$\leq \frac{\Delta T(t,x)}{\Delta T_{f,e}(t_{dw})} \leq$	1.0

4.2.1 乾燥壁の温度上昇時間について妥当性の検証

等価加熱温度で示した簡易予測式の妥当性について検証を行う。火災成長率 $\beta=233$ の標準加熱曲線を加熱条件として、等価加熱温度で示した簡易予測式を用いて乾燥壁の温度上昇時間を予測する。計算対象とする 60 分時の加熱温度 $T_f=930^\circ\text{C}$ で一定とした場合の簡易予測式および数値解との比較より、妥当性を検証する。

4.2.1.1 計算条件

(0) 共通条件

表 4-2-2 の物性値を持つ壁について、含水率 $\phi=0\%$ として、加熱面からの距離が $0\sim 70\text{mm}$ における温度上昇時間 (80K、180K) を求める。初期温度は 20°C とする。

(a) 加熱温度一定の簡易予測式

火災成長率 $\beta=233$ の標準加熱曲線が、計算対象とする 60 分時に到達する温度を式 4.1.1 で求め、

$$T_f(t) = 233 \times (60 \times 60)^{1/6} + 20 = 930^\circ\text{C} \quad (4.2.3)$$

$T_f=930^\circ\text{C}$ で加熱一定の条件下とする。

(b) 等価加熱温度で示した簡易予測式

火災成長率 $\beta=233$ とする。温度上昇時間について陽に解くことはできないが、式 4.2.2 を用いることで、間接的ではあるが、乾燥壁の温度上昇時間と加熱面からの距離の関係を求めることができる。

(c) 数値解析

火災成長率 $\beta=233$ とした標準加熱曲線を用いる。加熱側表面の境界条件は表 4-2-3 を用い、非加熱側境界条件は半無限固体とみなすために、 70mm での温度上昇が表面温度上昇の 0.5% 以下となるように留意して、壁厚を 140mm として計算を行った (以後このように壁厚を設定する場

合、非加熱側境界条件を半無限固体近似する、と示す)。解析時間刻みを1秒として節点距離は1mmで行った。

表 4-2-2 土壁の物性値

	乾燥密度 [kg/m ³]	比熱 [kJ/kg K]	熱伝導率 ×10 ⁻³ [kW/m K]
土壁	1360	0.88	0.4

表 4-2-3 環境条件

	熱伝達率[kW/m ² K]	輻射伝達率
加熱側	0.03	0.8
外気側	0.01	0.8

4.2.1.2 計算結果

(a) 簡易予測式

乾燥壁の温度上昇時間の簡易予測式に上記の条件を与えると以下のように表わされる。

・加熱温度一定の簡易予測式

温度上昇 $\Delta T(x, t) = 80\text{K}$ のとき

$$t_{dw} = \left(1.8 - 6 \frac{80}{910}\right)^{-2} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{0.33 \times 10^{-6}}}\right)^2 = 0.47 \times 10^6 x^2 \quad (\text{s}) \quad (4.2.4)$$

温度上昇 $\Delta T(x, t) = 180\text{K}$ のとき

$$t_{dw} = \left(1.2 - 1.5 \frac{180}{910}\right)^{-2} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{0.33 \times 10^{-6}}}\right)^2 = 0.93 \times 10^6 x^2 \quad (\text{s}) \quad (4.2.5)$$

・等価加熱温度で示した簡易予測式

温度上昇時間について陽に解くことはできないため、間接的ではあるが次式を用いて、乾燥壁の温度上昇時間と加熱面からの距離の関係を得ることができる。

温度上昇 $\Delta T(x, t) = 80\text{K}$ のとき

$$x = 1.15 \times 10^{-3} \left(A_n - B_n \frac{0.4}{t_{dw}^{1/6}} \right) \cdot t_{dw}^{1/2} \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{0.4}{t_{dw}^{1/6}} \leq R_n \right\} \quad (4.2.6)$$

温度上昇 $\Delta T(x, t) = 180\text{K}$ のとき

$$x = 1.15 \times 10^{-3} \left(A_n - B_n \frac{0.9}{t_{dw}^{1/6}} \right) \cdot t_{dw}^{1/2} \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{0.9}{t_{dw}^{1/6}} \leq R_n \right\} \quad (4.2.7)$$

(b) 簡易予測式と数値解の比較

図 4-2-1 に乾燥壁の温度上昇時間(80K、180K)と加熱面からの距離の関係を示す。数値解を記号で示し、加熱温度を一定とした簡易予測式の結果を破線で、等価加熱温度を用いた簡易予測式の結果を実線で示す。

- ・加熱温度一定の簡易予測式と等価加熱温度を用いた簡易予測式を比較すると、等価加熱温度を用いた簡易予測式の方が数値解に近い値をとることが分かる。
- ・等価加熱温度を用いた簡易予測式と数値解を比較すると、簡易予測式の方が温度上昇時間を小さく見積もることが分かる。

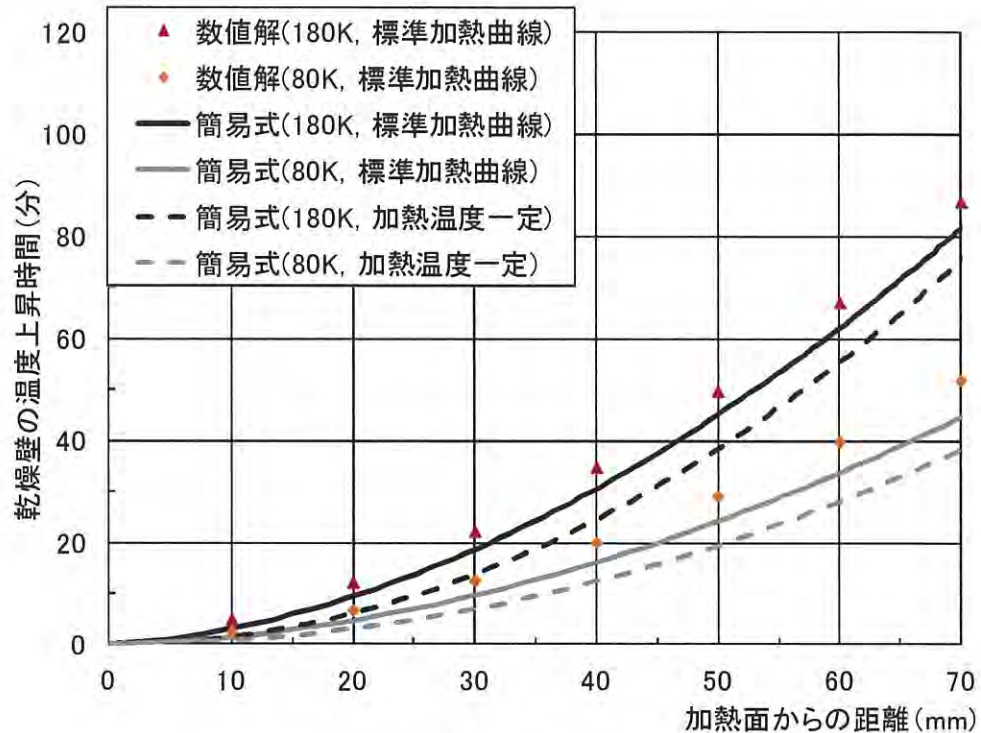


図 4-2-1 乾燥壁の温度上昇時間(80K、180K)
(簡易予測式と数値解の比較)

そこで、ある温度上昇に達するときの時間と位置を示すフーリエ数 $1/2F_0^{1/2}$ を用いて、標準加熱曲線を等価加熱温度で近似した際の誤差について考察を行う。

図 4-2-2 に標準加熱曲線の条件下で数値計算から求めたフーリエ数を横軸に、等価加熱温度を用いた簡易式と前章で示した加熱温度一定の簡易式から求めたフーリエ数を縦軸にとる。加熱面からの距離が 40mm の位置を代表値として、温度上昇が 80K、180K に至るフーリエ数の比を示す。

- ・等価加熱温度を用いた簡易式、加熱温度一定とした簡易式共に、斜線より上にプロットされているということは、安全側の評価を示している。
- ・等価加熱温度を用いた簡易式と標準加熱曲線の数値解を比較すると、温度上昇を大きく設定する方が誤差は小さくなる傾向にある。
- ・ $\beta t^{1/6}$ で表わされる加熱温度曲線は、加熱初期の温度上昇が急激であるのに対し、時間が進むにつれて温度上昇はほぼ横ばいとなる。これを均して等価加熱温度として与えているため、時間が進むにつれて加熱初期の急激な温度上昇の影響が相対的に緩和されるためと考えられる。
- ・その差は最大で温度上昇時間の 1 割程度であり、常に安全側の評価となるため、等価加熱温度を用いた簡易予測式の妥当性を示すことが出来たと考える。

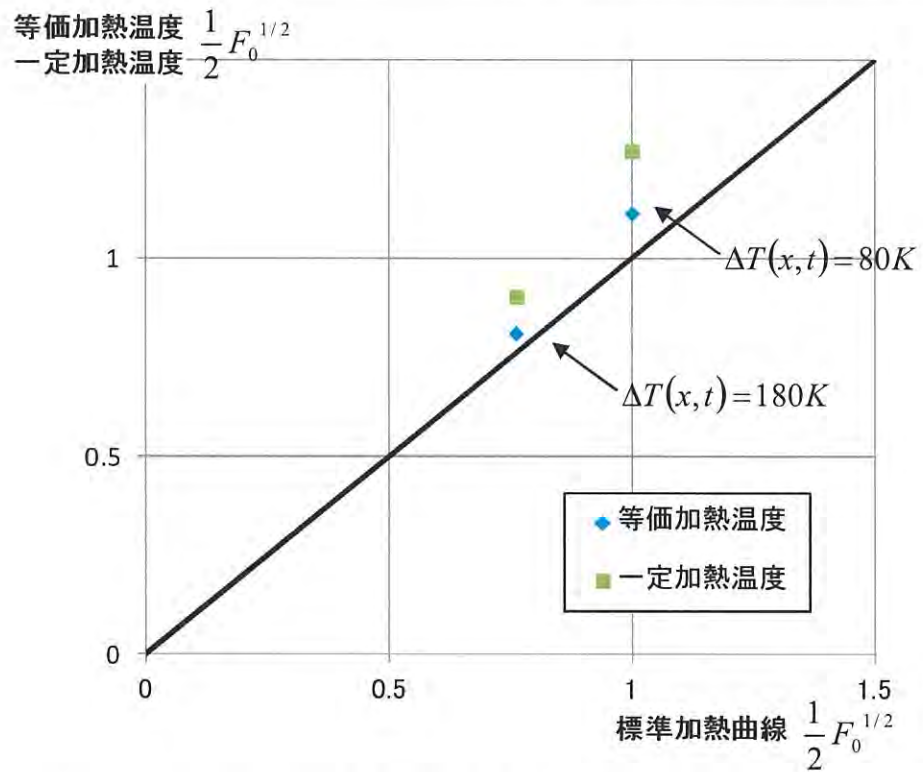


図 4-2-2 ある温度上昇に達するときのフーリエ数 $\frac{1}{2}F_0^{1/2}$ の比較
(簡易予測式と数値解の比較)

4.3 蒸発時間の簡易予測式

乾燥壁の温度上昇モデルについては等価加熱温度を用いて簡易予測式を示すことが出来た。そこで水分蒸発モデルについても式 3.3.7 の加熱温度 T_f を、等価加熱温度 $T_{f,e}(t)$ で置き換えることを考える。加熱一定の条件下における蒸発時間についての簡易予測式を再掲する。

$$t_v = \frac{4.9 \times 10^3}{D} \left(\frac{\phi}{C_w(T_f - T_v)} \right) \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \quad (3.3.7)$$

ここに

α : 熱拡散率 (m^2/s)

C_w : 比熱 (kJ/kgK)

ϕ : 部材乾燥質量に対する含水率 (kg/kg)

T_f : 加熱表面温度 (K)

T_v : 水分の蒸発温度 (K)

D : 比例定数

この場合も等価加熱温度自体が蒸発時間 t_v の関数となるため、下式のように表わされる。

$$t_v = \frac{4.9 \times 10^3}{D} \left\{ \frac{\phi}{C_w(T_{f,e}(t_v) - T_v)} \right\} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \quad (4.3.1)$$

上式は、蒸発時間 t_v について陽に解くことが出来ないが、

$T_{f,e}(t_v) \gg T_v$ であるため、

$$T_{f,e}(t_v) - T_v \approx T_{f,e}(t_v) - T_0 = \frac{6}{7} \beta t_v^{1/6} \quad (4.3.2)$$

と近似すると、

$$t_v^{7/6} = \frac{4.9 \times 10^3}{D} \left\{ \frac{\phi}{C_w \cdot 6/7 \beta} \right\} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \quad (4.3.3)$$

これから蒸発時間を求めることができる。

$$t_v = \left\{ \frac{4.9 \times 10^3}{D} \frac{7}{6} \frac{\phi}{C_w \beta} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \right\}^{6/7} \quad (4.3.4)$$

4.3.1 蒸発時間について妥当性の検証

火災成長率 $\beta=233$ の標準加熱曲線を加熱条件として、等価加熱温度で示した簡易予測式を用いて蒸発時間を予測する。数値解との比較より、蒸発時間における等価加熱温度の妥当性を検証する。

4.3.1.1 計算および実験条件

(0) 共通条件

表 4-2-2 の物性値を持つ壁について、含水率を 3.75、7.5% として、加熱面からの距離が 0～70mm における蒸発時間を求める。初期温度は 20℃ とする。

(a) 等価加熱温度で示した簡易予測式

火災成長率 $\beta=233$ 、比例定数については前章で数値解より推定した $D=0.64$ ($\phi=3.75\%$)、 0.67 ($\phi=7.5\%$) を用いる。式 4.3.4 を用いて蒸発時間を求める。

(b) 数値解析

火災成長率 $\beta=233$ とした標準加熱曲線を用いる。加熱側表面の境界条件は表 4-2-3 を用い、非加熱側境界条件を半無限固体近似とした。解析時間刻みを 1 秒として節点距離は 1mm で行った。含水率を 3.75、7.5% として、100℃ に達するときの含湿壁の温度上昇時間 (80K) を求め、それから含水率を 0% としたときの乾燥壁の温度上昇時間 (80K) を差し引いて、蒸発時間を求める。

4.3.1.2 計算結果

(a) 簡易予測式

蒸発時間の簡易予測式に上記の条件を与えると以下のように表わされる。

含水率 $\phi=3.75\%$ のとき

$$t_v = \left\{ \frac{4.9 \times 10^3}{0.64} \frac{7}{6} \frac{0.0375}{0.88 \cdot 233} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{0.33 \times 10^{-6}}} \right)^2 \right\}^{6/7} = 1.67 \times 10^5 \cdot x^{12/7} \quad (4.3.5)$$

含水率 $\phi=7.5\%$ のとき

$$t_v = \left\{ \frac{4.9 \times 10^3}{0.67} \frac{7}{6} \frac{0.075}{0.88 \cdot 233} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{0.33 \times 10^{-6}}} \right)^2 \right\}^{6/7} = 2.91 \times 10^5 \cdot x^{12/7} \quad (4.3.6)$$

(b) 簡易予測式と数値解の比較

図 4-3-1 に蒸発時間 ($\phi=3.75\%$ 、 7.5%) と加熱面からの距離の関係を示す。数値解を記号で示し、等価加熱温度を用いた簡易予測式の結果を実線で示す。

・等価加熱温度を用いた簡易予測式と数値解を比較すると、含水率が 3.75% のときは良い一致を見せることが分かる。含水率が 7.5% のときも加熱面からの距離が小さい位置では良い一致を見せるが、加熱面からの距離が大きくなるとその差が次第に大きくなることが分かる。

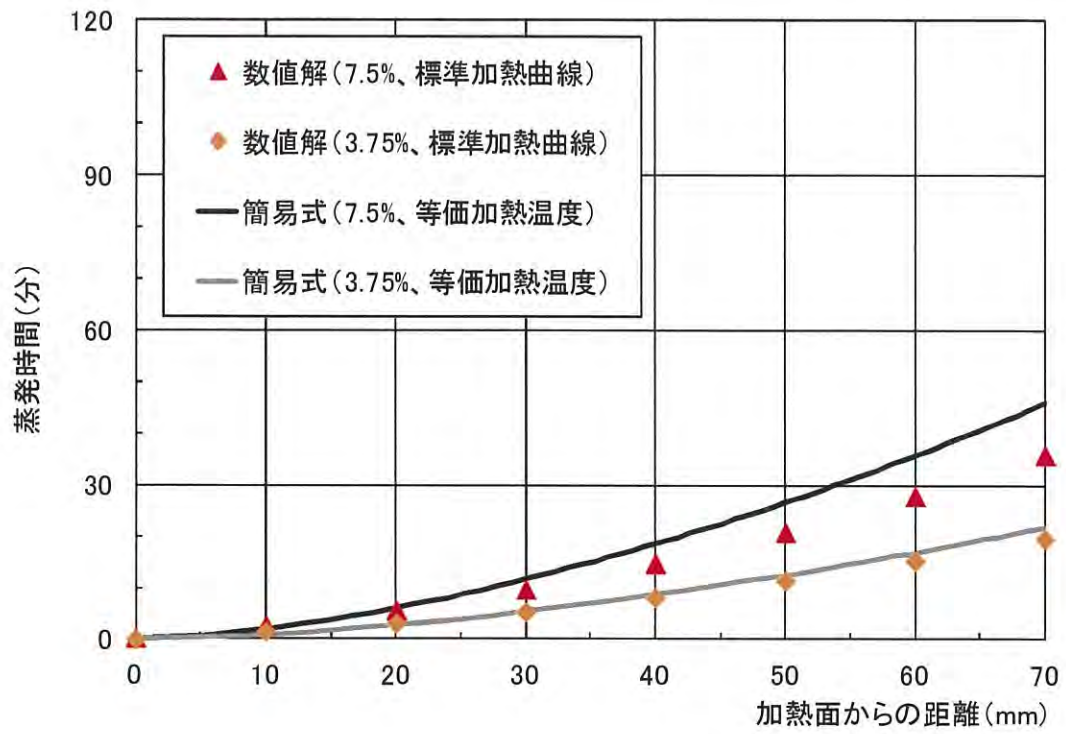


図 4-3-1 蒸発時間(3.75%、7.5%)
簡易予測式と数値解の比較

4.4 含湿壁の温度上昇時間について妥当性の検証

乾燥壁の温度上昇時間と蒸発時間について、等価加熱温度を用いた簡易予測式を示した。そこで加熱一定の条件下で、乾燥壁の温度上昇と蒸発時間を足し合わせることで求めた含湿壁の温度上昇の簡易予測式が、等価加熱温度を用いた場合にも成り立つのではないかと考える。

$$t_{wet} = t_{dw} + t_v \quad \{T(x, t) \geq T_v\} \quad (4.4.1)$$

ここに

t_{dw} : 等価加熱温度 $T_{f,e}(t)$ を用いて求めた乾燥壁の温度上昇時間

t_v : 等価加熱温度 $T_{f,e}(t)$ を用いて求めた蒸発時間

第2章で示した標準加熱曲線下における土壁の加熱実験および数値解と比較することで、等価加熱温度を用いた含湿壁の温度上昇の簡易予測式の妥当性を検証する。

4.4.1 計算条件と実験条件

(0) 共通条件

表4-4-1の物性値（熱伝導率は、後述する推定熱拡散率と実験時の測定密度、文献値⁽⁹⁾の比熱を用いて計算した）をもつ壁について、火災成長率 $\beta=233$ の標準加熱曲線で加熱した場合について、加熱面からの距離が0～70mmにおける温度上昇時間（80K、180K）を求める。蒸発温度は100℃とする。

表4-4-1 土壁の物性値

	乾燥密度 [kg/m ³]	比熱 [kJ/kg K]	熱伝導率 ×10 ⁻³ [kW/m K]	熱拡散率 ×10 ⁻⁶ [m ² /s]
土壁	1360	0.88	0.48	0.4

(a) 加熱実験

実験値は第2章で報告した標準加熱曲線下における土壁の加熱実験の値を用いた。試験体サンプルから求めた含水率の平均値をとって、通常の養生を行った試験体A-④～⑥（土壁40～70mm）については含水率が3.75%であったとみなす。加熱直前に水分を含浸させた試験体B-④（土壁40mm）については、含浸させた水分量から計算して含水率は7.5%であったとみなす。各測定点における初期温度の平均値は22℃であった。

(b) 等価加熱温度で示した簡易予測式

初期温度を20℃、含水率は3.75、7.5%の2通りとする。比例定数については前章で数値解より推定した $D=0.64$ （ $\phi=3.75\%$ ）、 0.67 （ $\phi=7.5\%$ ）を用いた。

乾燥壁の温度上昇時間について陽に解くことはできないが、式4.2.2を用いることで、間接的ではあるが、乾燥壁の温度上昇時間と加熱面からの距離の関係を求めることができる。

蒸発時間については、式4.3.4を用いて求める。

両者を足し合わせて含湿壁の温度上昇時間（80K、180K）を求める。

(c) 数値解析

初期温度を20℃、含水率は3.75、7.5%の2通り。加熱側表面の境界条件は表4-2-3を用い、非加熱側境界条件は半無限固体とした。解析時間刻みを1秒として節点距離は1mmで行った。

4.4.2 計算結果と実験値の比較

(a) 簡易予測式

まず乾燥壁の温度上昇時間の簡易予測式 (4.2.1) は、時間について陽に解くことができないため、間接的ではあるが次式を用いて、乾燥壁の温度上昇時間と加熱面からの距離の関係を求めることができる。これを図 4-4-1～3 に青の実線で示す。

・温度上昇 $\Delta T(x, t) = 80\text{K}$ のとき

$$x = 1.26 \times 10^{-3} \left(A_n - B_n \frac{0.4}{t_{dw}^{1/6}} \right) \cdot t_{dw}^{1/2} \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{0.4}{t_{dw}^{1/6}} \leq R_n \right\} \quad (4.4.2)$$

・温度上昇 $\Delta T(x, t) = 180\text{K}$ のとき

$$x = 1.26 \times 10^{-3} \left(A_n - B_n \frac{0.9}{t_{dw}^{1/6}} \right) \cdot t_{dw}^{1/2} \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{0.9}{t_{dw}^{1/6}} \leq R_n \right\} \quad (4.4.3)$$

次に蒸発時間の簡易予測式に、上記の条件を与えると以下のように表わされる。

・含水率 $\phi = 3.75\%$ のとき

$$t_v = \left\{ \frac{4.9 \times 10^3}{0.64} \frac{7}{6} \frac{0.0375}{0.88 \cdot 233} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{0.4 \times 10^{-6}}} \right)^2 \right\}^{6/7} = (0.95 \times 10^6 \cdot x^2)^{6/7} \quad (4.4.4)$$

・含水率 $\phi = 7.5\%$ のとき

$$t_v = \left\{ \frac{4.9 \times 10^3}{0.67} \frac{7}{6} \frac{0.075}{0.88 \cdot 233} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{0.4 \times 10^{-6}}} \right)^2 \right\}^{6/7} = (1.9 \times 10^6 \cdot x^2)^{6/7} \quad (4.4.5)$$

含湿壁の温度上昇時間はこれらを足し合わせることで求める (式 4.4.1)。これを図 4-4-1～3 に黒の実線で示す。

(b) 簡易予測式と実験結果および数値解の比較

図 4-4-1～3 に土壁の温度上昇時間 (80K、180K) と加熱面からの距離の関係を示す。実験値を中抜きの記号で、数値解を点線で、簡易予測式を黒の実線で示す。簡易予測式については乾燥壁の温度上昇時間も青の実線で示す。

・簡易予測式と実験値を比較すると、図 4-4-1 より温度上昇 80K に対する含湿壁の温度上昇時間はよい一致を見せている。図 4-4-2 のように求めたい温度上昇を 180K に変化させてもよい一致を見せており、また図 4-4-3 で異なる含水率についてもよい一致を見せることが分かる。

・簡易予測式と数値解を比較すると、含水率を 3.75% に設定した時は、簡易予測式の方が含湿壁の温度上昇時間を小さく見積もる傾向にある。これは乾燥壁の温度上昇時間の算定において指摘したように、表面温度を加熱温度として近似することによるものである。

・これに対し含水率を 7.5% に設定した時は、数値解と簡易予測式の差が加熱面からの距離に応じて変化しており、40mm を超えると簡易予測式の方が温度上昇時間を大きく見積もるようになる。これは蒸発時間の算定において生じる誤差が影響していると考えられる。

・簡易予測式について含湿壁の温度上昇時間に占める蒸発時間の割合について着目する。温度上昇を 80K と 180K にとるときで比較すると、80K の温度上昇に対しては、蒸発時間の割合は大きく温度上昇時間の 1/3 程度を占めているが、180K の温度上昇に対しては、蒸発時間の割合は温度上昇時間の 1/5 程度にまで減る。このように含水率 3.75% 程度でも温度上昇を小さく設定

する時は、含湿壁の温度上昇時間に占める水分蒸発の影響は大きくなることが分かる。

含湿壁の温度上昇時間の簡易予測式について、実験値との比較から妥当性を検証した。乾燥壁の温度上昇時間と水分蒸発により稼がれる時間（蒸発時間）に分けてその影響の度合を把握できることは有用である。

課題としては、蒸発時間については含水率を高く設定すると、加熱面からの距離が大きい位置で蒸発時間に差が生じることが分かった。

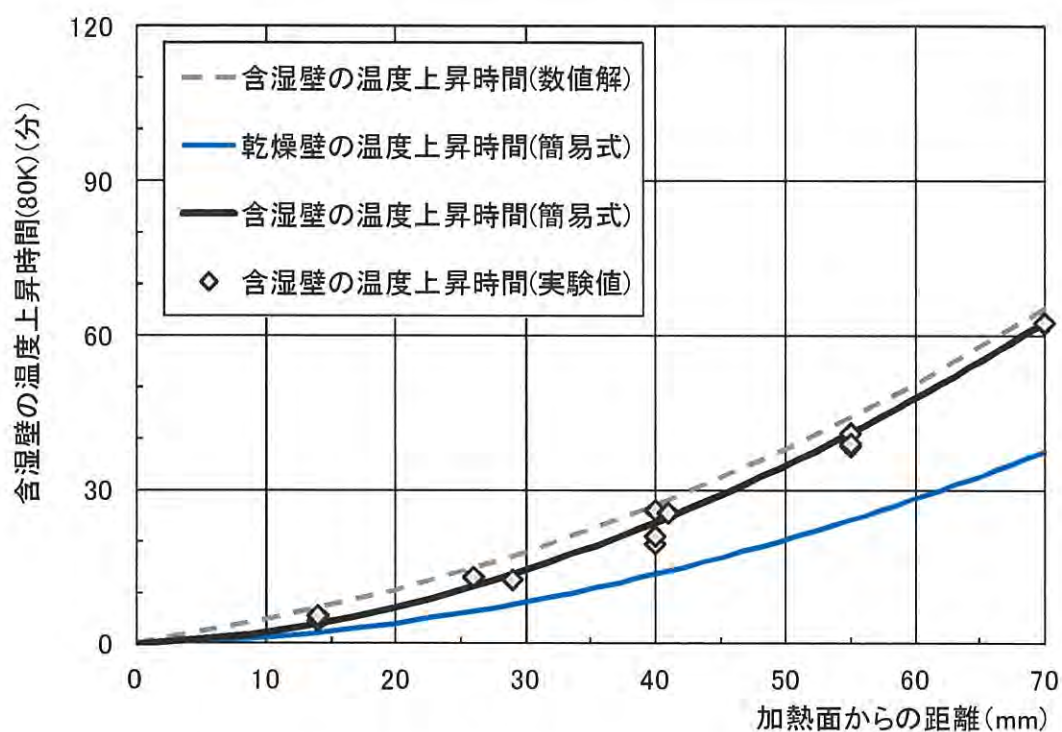


図 4-4-1 含湿壁の温度上昇時間(80K, $\phi = 3.75\%$)
簡易予測式、数値解、実験値(試験体 A-④～⑥)の比較

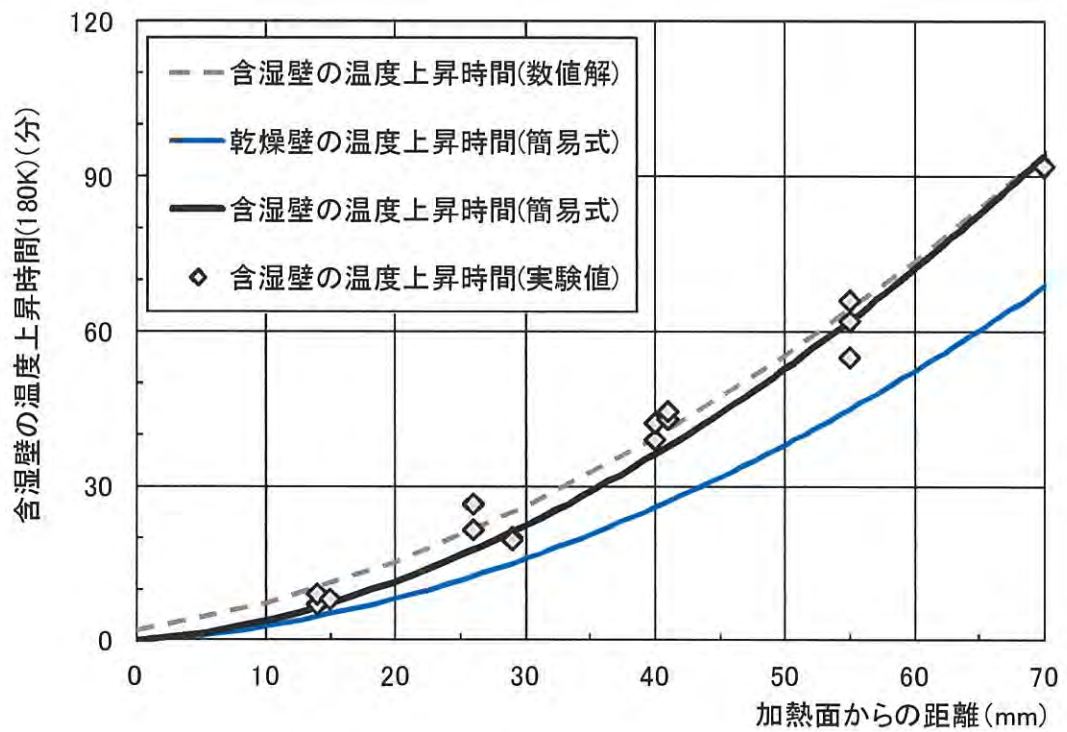


図 4-4-2 含湿壁の温度上昇時間(180K 到達時間, $\phi = 3.75\%$)
簡易予測式、数値解、実験値(試験体 A-④～⑥)の比較

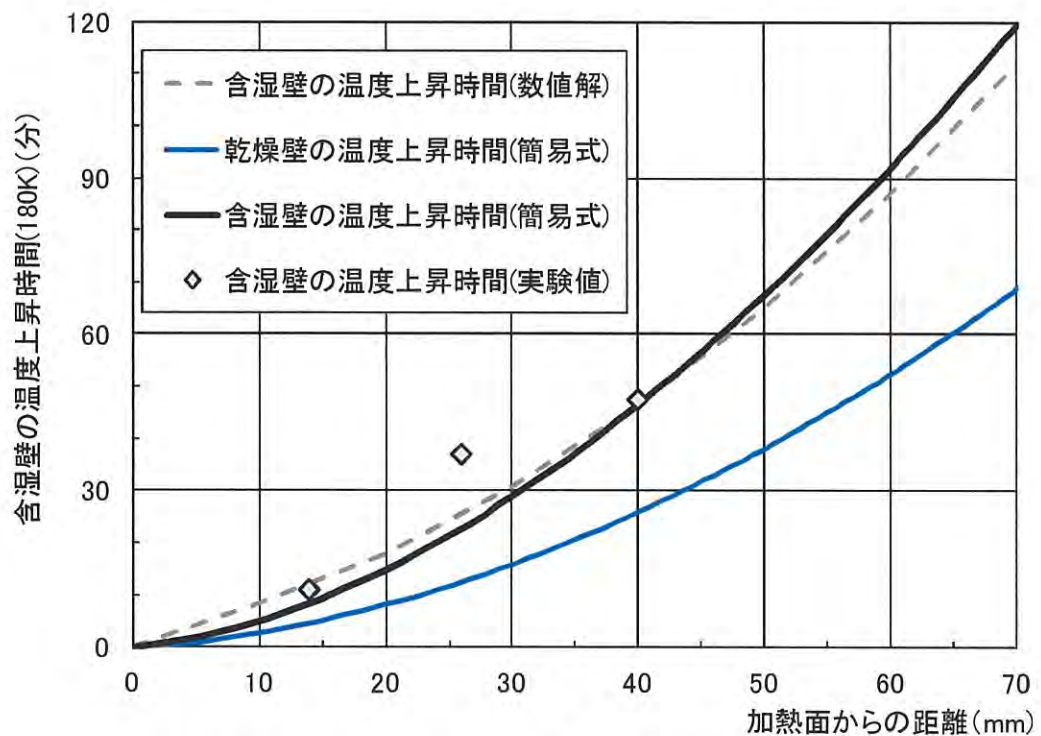


図 4-4-3 含湿壁の温度上昇時間(180K, $\phi = 7.5\%$)
簡易予測式、数値解、実験値(試験体 B-④)の比較

4.5 乾燥壁の温度上昇の簡易予測式

前節までで乾燥壁の温度上昇時間と蒸発時間の簡易予測式を、標準加熱曲線下に適用したことで、実験値との比較が可能になった。実験値は熱電対を用いて、ある点の温度履歴として測定されるため、温度履歴を簡易に予測できれば便利である。

前章で示したように、乾燥壁の温度上昇時間を求める簡易予測式は、乾燥壁の温度上昇 $\Delta T_{dw}(x, t)$ を予測する式 (4.5.1) に変形することもできる。

$$\Delta T_{dw}(x, t) = \frac{A_n}{B_n} \left(1 - \frac{1}{A_n} \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \cdot \Delta T_{f,e}(t) \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t)} \leq R_n \right\} \quad (4.5.1)$$

係数の適用範囲については無次元数 $1/2F_0^{1/2}$ についても示すことができる。

$$R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t)} \leq R_n \quad \text{のとき、} \quad L_n \leq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} < L_{n-1} \quad (4.5.2)$$

ここに

$\Delta T_{f,e}(t) = T_{f,e}(t) - T_0$: 等価加熱温度を用いた加熱側表面での温度上昇 (K)

n : 近似番号

R_{n-1}, R_n : 近似番号 n を適用する無次元温度の下限と上限

L_n, L_{n-1} : 近似番号 n を適用する無次元数 $1/2F_0^{1/2}$ の下限と上限

A_n, B_n は、 $R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t)} \leq R_n$ または $L_n \leq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} < L_{n-1}$ に応じて変化する係数 (表4-5-1参照)

表 4-5-1 簡易予測式の係数対応表

n	A_n	B_n	適用範囲			適用範囲		
			L_{n-1}	$1/2F_0^{1/2}$	L_n	R_{n-1}	無次元温度	R_n
1	2	10	2.0	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \geq$	1.5	0	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t)} \leq$	0.05
2	1.8	6	1.5	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \geq$	1.2	0.05	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t)} \leq$	0.1
3	1.5	3	1.2	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \geq$	0.9	0.1	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t)} \leq$	0.2
4	1.2	1.5	0.9	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \geq$	0.6	0.2	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t)} \leq$	0.4
5	1	1	0.6	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \geq$	0	0.4	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t)} \leq$	1.0

そこで式 4.5.1 で x を固定して、標準加熱曲線下における、ある位置 x での乾燥壁の温度履歴を求める方法を考える。

(a) ここで式 4.5.1 を用いて、実践的に乾燥壁のある点 x で時間 t における温度上昇を求めようとする、係数 A_n 、 B_n は無次元温度 $\Delta T_{dw}(x, t) / \Delta T_{f,e}(t)$ に応じて変化するため、温度上昇 $\Delta T_{dw}(x, t)$ が必要になる。すなわち温度上昇 $\Delta T_{dw}(x, t)$ について陽に解けないことが分かる。

ここで、係数の適用範囲の上限および下限値が、無次元数 $1/2F_0^{1/2}$ および無次元温度 $\Delta T(x, t) / \Delta T_{f,e}(t)$ の双方に対して示され、両者が対応していることに着目する（表 4-5-1）。これはもともと半無限固体の理論解（式 3.2.3）を 5 つの直線で線形近似した際の遷移点であり、

$$\frac{T(x, t) - T_0}{T_{f,e}(t) - T_0} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (3.2.3)$$

式 3.2.3 の解の 1 つであることから、

$$\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} = L_n \text{ のとき、} \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t)} = R_n \text{ となることを示している。} \quad (4.5.3)$$

ただし、前節までの考察より、表面温度を等価加熱温度に置き換えて示す。

すなわち、表 4.5.1 を余誤差関数の 5 点対照表として用いることで、位置 x と熱拡散率 α を固定して時間 t が $x/2(\alpha t)^{1/2} = L_n$ ($n=1\sim5$) を満たす時間 t_n に限り、温度上昇 $\Delta T(x, t)$ を簡易に求めることができる（式 4.5.4）。

$$t_n = \left\{ \frac{1}{L_n} \cdot \frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right\}^2 \text{ のとき、} \quad \Delta T_{dw}(x, t) = R_n \cdot \Delta T_{f,e}(t) = R_n \cdot \frac{6}{7} \beta t_n^{1/6} \quad (4.5.4)$$

その後、中間の時間帯における温度上昇については、 A_n 、 B_n が一意に決められるので、式 4.5.1 を用いてある x の点の温度履歴を求めることができる。

そこで、火災成長率 $\beta=233$ の標準加熱曲線を加熱条件として、等価加熱温度で示した簡易予測式を用いて乾燥壁の温度履歴を予測する。それと数値解を比較して、温度履歴の簡易予測式の妥当性を検証する。

4.5.1 計算条件

(0) 共通条件

表 4-5-1 の物性値をもつ壁について、含水率を 0% として乾燥壁とみなし、初期温度 20℃、蒸発温度 100℃、火災成長率 $\beta=233$ の標準加熱曲線で加熱した場合について、加熱面からの距離が 40mm における温度履歴を求める。

(a) 等価加熱温度で示した簡易予測式

まず、式 4.5.4 を用いて近似式の遷移点である時間 t_n における温度上昇を求める。次に式 4.5.1 を用いて中間の時間帯における温度上昇を求める。

(b) 数値解析

加熱側表面の境界条件は表 4-2-3 を用い、非加熱側境界条件は半無限固体近似とした。解析時間刻みを 1 秒として節点距離は 1mm で行った。

4.5.2 計算結果

(a) 簡易予測式

まず、式 4.5.4 を用いて時間 t_n における温度上昇を求める。

$$t_0 = \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{0.04}{2\sqrt{0.4 \times 10^{-6}}} \right) \right\}^2 = 249 \text{ (s)}, \quad \Delta T(0.04, t_0) = 0 \text{ (K)}$$

$$t_1 = \left\{ \frac{1}{1.5} \left(\frac{0.04}{2\sqrt{0.4 \times 10^{-6}}} \right) \right\}^2 = 445 \text{ (s)}, \quad \Delta T(0.04, t_1) = 552 \text{ (K)}$$

$$t_2 = \left\{ \frac{1}{1.2} \left(\frac{0.04}{2\sqrt{0.4 \times 10^{-6}}} \right) \right\}^2 = 692 \text{ (s)}, \quad \Delta T(0.04, t_2) = 594 \text{ (K)}$$

$$t_3 = \left\{ \frac{1}{0.9} \left(\frac{0.04}{2\sqrt{0.4 \times 10^{-6}}} \right) \right\}^2 = 1232 \text{ (s)}, \quad \Delta T(0.04, t_3) = 654 \text{ (K)}$$

$$t_4 = \left\{ \frac{1}{0.6} \left(\frac{0.04}{2\sqrt{0.4 \times 10^{-6}}} \right) \right\}^2 = 2777 \text{ (s)}, \quad \Delta T(0.04, t_4) = 749 \text{ (K)}$$

次に遷移点の中間の時間帯における温度上昇については、 A_n 、 B_n が一意に決めることができるようになるので、式 4.5.5 と表 4-5-2 を用いて温度上昇を求める。

$$\Delta T_{dw}(x, t) = \frac{A_n}{B_n} \left(1 - \frac{1}{A_n} \frac{0.04}{2\sqrt{0.4 \times 10^{-6} \cdot t}} \right) \cdot \frac{6}{7} \beta t^{1/6} \quad (4.5.5)$$

表 4-5-2 係数対応表

n	A_n	B_n	適用範囲		
			t_{n-1}	時間(s)	t_n
1	2	10		$t \leq$	445
2	1.8	6	445	$\leq t \leq$	692
3	1.5	3	692	$\leq t \leq$	1232
4	1.2	1.5	1232	$\leq t \leq$	2777
5	1	1	2777	$\leq t$	

(b) 簡易式と数値解の比較

図 4-5-3 に 40mm の位置における乾燥壁の温度上昇履歴を示す。数値解を点線で、簡易予測式を黒の実線で示す。赤点で示すのは簡易予測式の遷移点である。

・簡易予測式は加熱開始から計算対象の 100 分時までを通じて、数値解と良い一致を見せることが分かる。

これにより温度上昇履歴の算定方法について妥当性が検証できた。

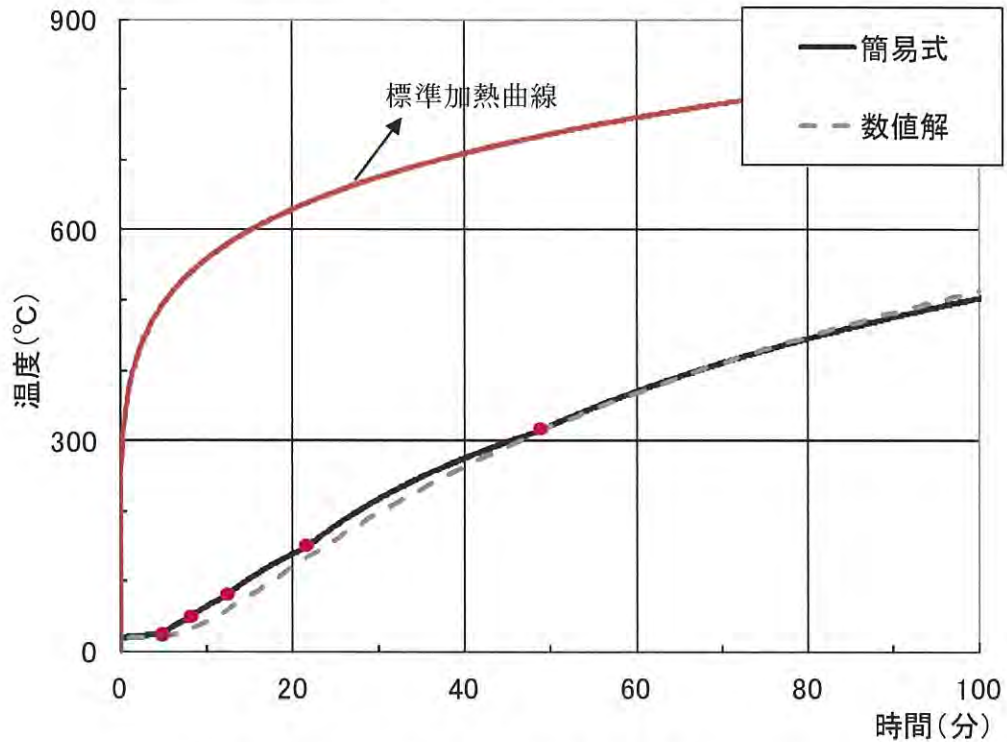


図 4-5-1 40mm の位置における乾燥壁の温度履歴
簡易予測式と数値解の比較

4.6 含湿壁の温度上昇の簡易予測式

前節では乾燥壁の温度上昇の算定方法を示し、妥当性の検証をおこなった。本節では、含湿壁の温度上昇の算定方法について考える。

(a) 前章で水分蒸発の影響について、以下の知見を得た。

- ①水分蒸発完了前までの温度上昇速度が乾燥壁に比較して遅くなることで表現されること
- ②水分蒸発完了後の温度上昇速度は、乾燥壁の 100℃到達後の温度上昇速度に比べ、ほとんど変化しないこと

そこで、水分蒸発が完了する時間の前後で分けて、含湿壁の温度上昇の算定方法について考える。

(STEP1) まず蒸発が完了する時間を求める。

乾燥壁の温度履歴から 100℃に到達する時間 $t_{dw,100}$ を求める。

$$100 - T_0 = \frac{A_n}{B_n} \left(1 - \frac{1}{A_n} \frac{x}{2\sqrt{\alpha t_{dw,100}}} \right) \cdot \Delta T_{f,e}(t_{dw,100}) \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{100 - T_0}{\Delta T_{f,e}(t_{dw,100})} \leq R_n \right\} \quad (4.6.1)$$

蒸発時間を求める。蒸発時間の簡易予測式を再掲する。

$$t_v = \left\{ \frac{4.9 \times 10^3}{D} \frac{7}{6} \frac{\phi}{C_w \beta} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \right\}^{6/7} \quad (4.3.4)$$

これらを足し合わせた時間が、蒸発が完了する時間である。ここまでの手順を図 4-8-1 に示す。

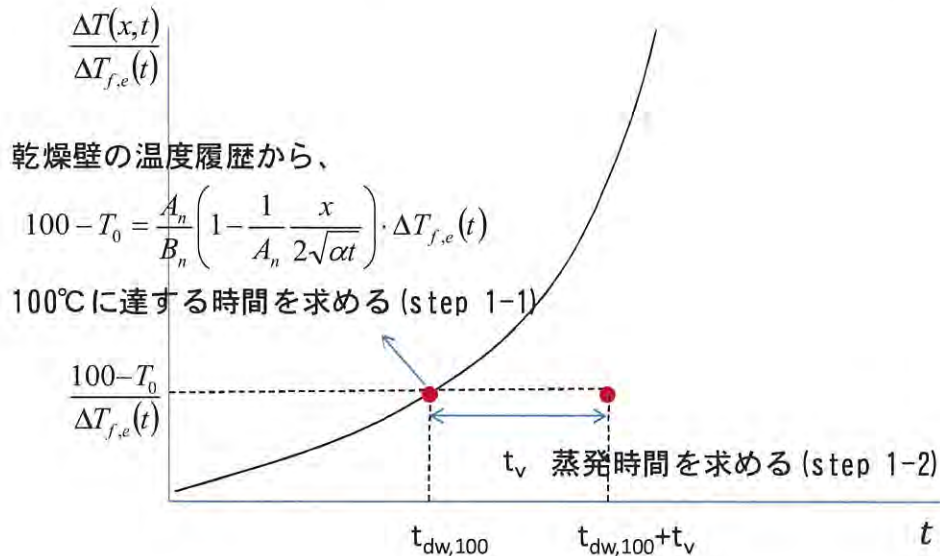


図 4-6-1 含湿壁の温度履歴の算定手順①(概念図)

(STEP2) 蒸発完了後の時間帯 $t > t_{dw,100} + t_v$ における含湿壁の温度履歴を求める。

乾燥壁の温度履歴の簡易予測式 (4.5.1) に現れる時間 t に対し、蒸発時間を差し引いた時間 $t - t_v$ を代入することで、蒸発完了後の温度履歴を求めることができる考える。

$$\Delta T_{wet}(x, t) = \frac{A_n}{B_n} \left(1 - \frac{1}{A_n} \frac{x}{2\sqrt{\alpha'(t - t_v)}} \right) \cdot \Delta T_{f,e}(t - t_v) \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T_{wet}(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t - t_v)} \leq R_n \right\} \quad (4.6.2)$$

(STEP3) 蒸発完了前の時間帯 $t < t_{dw,100} + t_v$ における含湿壁の温度履歴を求める。

水分蒸発完了前までの温度上昇速度が乾燥壁に比較して遅くなることから、水分の蒸発潜熱により見かけの比熱が大きくなると考え、乾燥壁の温度履歴の簡易予測式に、蒸発が完了する時間と温度上昇 $100 - T_0$ を代入して水分の影響を含んだ熱拡散率 α' を求める。

$$\frac{100 - T_0}{\Delta T_{f,e}(t_{dw,100} + t_v)} = \frac{A_n}{B_n} \left(1 - \frac{1}{A_n} \frac{x}{2\sqrt{\alpha'(t_{dw,100} + t_v)}} \right) \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T_{wet}(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t_{dw,100} + t_v)} \leq R_n \right\} \quad (4.6.3)$$

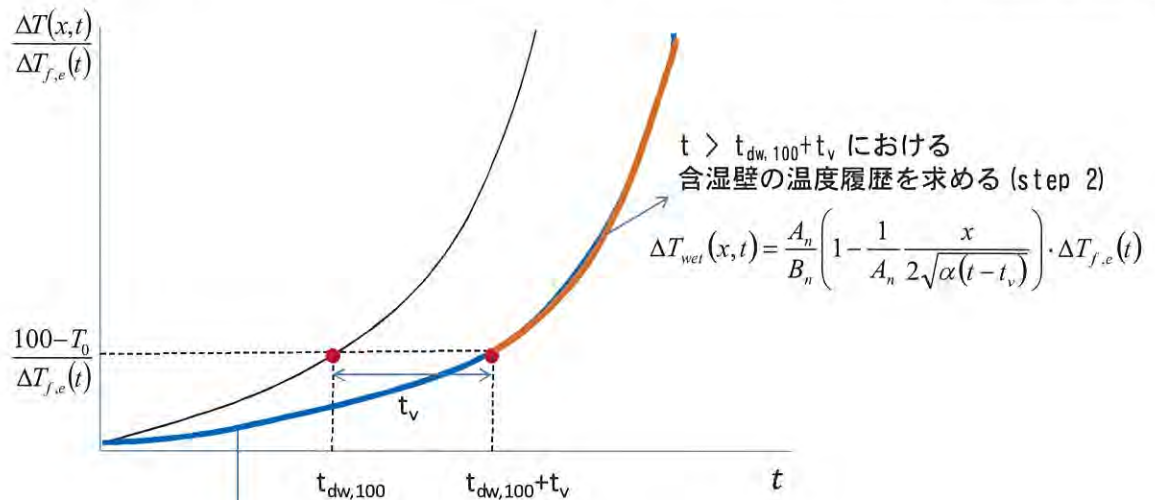
α' について整理して

$$\alpha' = \left(A_n - B_n \frac{100 - T_0}{\Delta T_{f,e}(t_{dw,100} + t_v)} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{(t_{dw,100} + t_v)}} \right)^2 \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{100 - T_0}{\Delta T_{f,e}(t_{dw,100} + t_v)} \leq R_n \right\} \quad (4.6.4)$$

求めた熱拡散率 α' を乾燥壁の温度履歴の簡易予測式に代入して、蒸発完了前の温度履歴を求めることができる考える。

$$\Delta T_{wet}(x, t) = \frac{A_n}{B_n} \left(1 - \frac{1}{A_n} \frac{x}{2\sqrt{\alpha' t}} \right) \cdot \Delta T_{f,e}(t) \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T_{wet}(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t)} \leq R_n \right\} \quad (4.6.5)$$

ここまでの算定手順を図 4-6-2 に示す。



$$\frac{100 - T_0}{\Delta T_{f,e}(t)} = \frac{A_n}{B_n} \left(1 - \frac{1}{A_n} \frac{x}{2\sqrt{\alpha'(t_{dw,100} + t_v)}} \right) \quad \text{となる } \alpha' \text{ を用いて}$$

$$\Delta T_{wet}(x,t) = \frac{A_n}{B_n} \left(1 - \frac{1}{A_n} \frac{x}{2\sqrt{\alpha' t}} \right) \cdot \Delta T_{f,e}(t) \quad \text{で求める (step 3)}$$

図 4-6-2 含湿壁の温度履歴の算定手順②(概念図)

そこで、火災成長率 $\beta = 233$ の標準加熱曲線を加熱条件として、等価加熱温度で示した簡易予測式を用いて含湿壁の温度履歴を予測する。それと実験値および数値解を比較して、含湿壁の温度履歴の簡易予測式について妥当性を検証する。

4.6.1 計算条件と実験条件

(0) 共通条件

表 4-4-1 の物性値（熱伝導率は、後述する推定熱拡散率と実験時の測定密度、文献値⁽⁹⁾の比熱を用いて計算した）をもつ壁について、火災成長率 $\beta=233$ の標準加熱曲線で加熱した場合について、加熱面からの距離が 29, 41, 55, 70mm における温度履歴を求める。

(a) 加熱実験

実験値は第2章で報告した標準加熱曲線下における土壁の加熱実験の値を用いた。含水率は試験体サンプルから求めた平均値をとって、3.75%であったとみなす。各測定点における初期温度の平均値は 22℃であった。

(b) 等価加熱温度で示した簡易予測式

初期温度 20℃として、乾燥壁の温度履歴（式 4.6.1）より 100℃に到達する時間 $t_{dw,100}$ を求める（詳しくは前節参照）。比例定数 $D=0.64$ として求める蒸発時間（式 4.3.4）と足し合わせて蒸発が完了する時間を求める。

蒸発完了後の温度履歴は式 4.6.2 を用いて求める。

蒸発完了前の温度履歴は、式 4.6.4 より水分の影響を含んだ見かけの熱拡散率 α' を求め、求めた α' を用いた式 4.6.5 より求める。

(c) 数値解析

初期温度 20℃として、加熱側表面の境界条件は表 4-2-3 を用い、非加熱側境界条件は半無限固体近似とした。解析時間刻みを 1 秒として節点距離は 1mm で行った。

4.6.2 計算結果と実験値の比較

まず代表として、加熱面からの距離が 41mm となる位置における温度履歴の計算結果を示す。

(a) 簡易予測式

図 4-5-3 より、乾燥壁の温度上昇が水分の蒸発温度に達する時間が求められる。

$$t_{dw,100} = 876 \text{ (s)} \quad (4.6.6)$$

式 4.3.4 に上記の条件を与えると

$$t_v = \left\{ \frac{4.9 \times 10^3}{0.64} \cdot \frac{7}{6} \cdot \frac{0.0375}{0.88 \cdot 233} \cdot \left(\frac{0.041}{2\sqrt{0.4 \times 10^{-6}}} \right)^2 \right\}^{6/7} \quad (4.6.7)$$

$$= (1.02 \times 10^6 \cdot 0.041^2)^{6/7} = 592 \text{ (s)}$$

これらを足し合わせて蒸発が完了する時間を求める。

$$t_{dw,100} + t_v = 876 + 592 = 1468 \text{ (s)} \quad (4.6.8)$$

・蒸発完了後 $t > t_{dw,100} + t_v$ における含湿壁の温度履歴を求める。実践的には、乾燥壁の温度上昇を既に求めているので、これを時間軸で t_v だけずらすことで求められる。

$$\Delta T_{wet}(x, t) = \frac{A_n}{B_n} \left(1 - \frac{1}{A_n} \frac{x}{2\sqrt{\alpha(t-532)}} \right) \cdot \Delta T_{f,e}(t-532) \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T_{wet}(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t-532)} \leq R_n \right\}$$

(4. 6. 9)

・ 蒸発完了前 $t < t_{\Delta T_v} + t_v$ における含湿壁の温度履歴を求める。

まず水分の影響を含んだ見かけの熱拡散率を求める。

$$\alpha' = \left(A_n - B_n \frac{100-20}{\Delta T_{f,e}(1408)} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{0.041}{2\sqrt{(1408)}} \right)^2 \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{100-20}{\Delta T_{f,e}(1408)} \leq R_n \right\} \quad (4. 6. 10)$$

$$= (1.5 - 3 \cdot 0.12)^{-2} \cdot 0.28 \times 10^{-6} = 0.22 \times 10^{-6} \quad (m^2 / s)$$

求めた熱拡散率 α' を乾燥壁の温度履歴の簡易予測式に代入して、蒸発完了前の温度履歴を求める。

$$\Delta T_{wet}(x, t) = \frac{A_n}{B_n} \left(1 - \frac{1}{A_n} \frac{0.041}{2\sqrt{0.22 \times 10^{-6} t}} \right) \cdot \Delta T_{f,e}(t) \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T_{wet}(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t)} \leq R_n \right\}$$

(4. 6. 11)

(b) 簡易予測式と実験結果および数値解の比較

図 4-6-3 に加熱面から 29、41、55、70mm の位置における含湿壁の温度履歴を示す。実験値を黒の実線で、数値解を点線で、簡易予測式を橙の実線で示す。

まず 100℃ 以下での温度履歴に注目する。

- ・ 簡易予測式と実験値を比較すると、実験結果の方が温度上昇は速く、100℃ に達してから温度停滞が観測されるため、差異が生じていることが分かる。
- ・ これに対し、水分蒸発がある時間ではある 1 点でのみ起きていると考える簡易予測式と数値解は良い一致を見せることが分かる。

次に 100℃ 以上での温度履歴に注目する。

- ・ 簡易予測式は各位置において、また計算対象の 100 分までの時間を通じて、数値解と良い一致を見せることが分かる。
- ・ 簡易予測式と実験値との比較では多少の差はみられるが、各位置においてよい一致を見せている。ただし加熱面に近い 29mm の位置では、300℃ を超えるあたりから温度上昇勾配に差が見られるようになる。

実験では加熱後に土壁表面がセラミック質に変化していたり、木舞層の炭化が観察されていることから、熱伝導率等の物性値が高温時に変化している可能性がある。本研究では物性値の温度依存性を考えていないため、温度依存性が大きい材料や条件を用いる場合は注意が必要である。

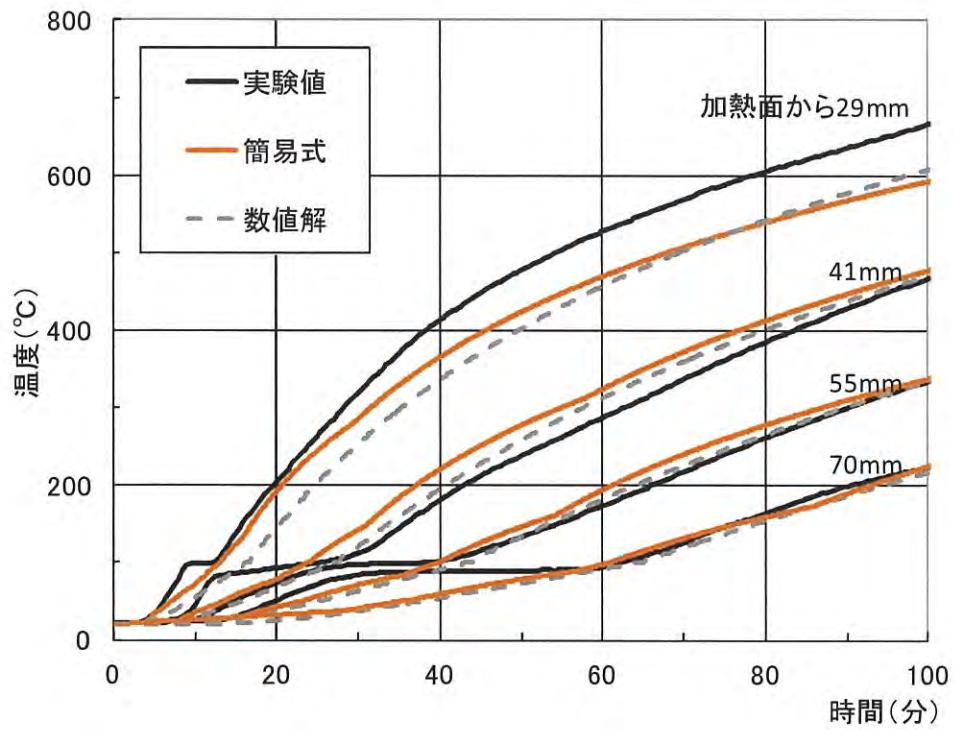


図 4-6-3 各位置における土壁の温度履歴 ($\phi=3.75\%$)
簡易予測式、数値解、実験値の比較

4.7 熱拡散率の推定

本研究の最終の目的は壁体の温度上昇を予測することであり、そのためには材料の物性値を得ることが必要になる。材料の熱特性に関わる物性値は密度、比熱、熱伝導率の3つであり、総合して熱拡散率 α として表わされる。前節で示した標準加熱曲線下における乾燥壁の温度上昇時間の簡易予測式は、熱拡散率 α の関数として表わされている。そこで水分蒸発前の時間帯を乾燥壁として考え、乾燥壁の温度上昇時間の簡易予測式 4.2.1 を変形して、実験の温度測定データから熱拡散率 α を推定する（式 4.7.1）。

$$\alpha = \left(A_n - B_n \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t_{dw})} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{t_{dw}}} \right)^2 \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t_{dw})} \leq R_n \right\} \quad (4.7.1)$$

4.7.1 推定熱拡散率の温度依存性

図 4-7-1 に試験体 A-⑤（土壁 55mm）の荒壁裏面温度（加熱面からの距離 40mm）の温度測定データを例にして、式 4.7.1 から推定した熱拡散率 α とその時の温度との関係を示す。ただし対象温度を水分蒸発の影響を考えて 100℃以下とした。また加熱温度 $T_f(t)$ には時間 t における炉内温度の平均値を与えた。

- ・加熱初期を除いて式 4.7.1 から推定される熱拡散率は概ね一定の値をとることがわかった。
- ・100℃付近で少し減少するのは水分蒸発が少しずつ始まってきている影響だと考えられる。
- ・30℃～90℃ではほとんど横ばいではあるが、80℃付近でわずかにピークが見られる。

式 4.7.1 では熱拡散率が大きいほど温度上昇時間を短く見積もることになるため、安全側をとって 80℃での推定熱拡散率を用いることとする。

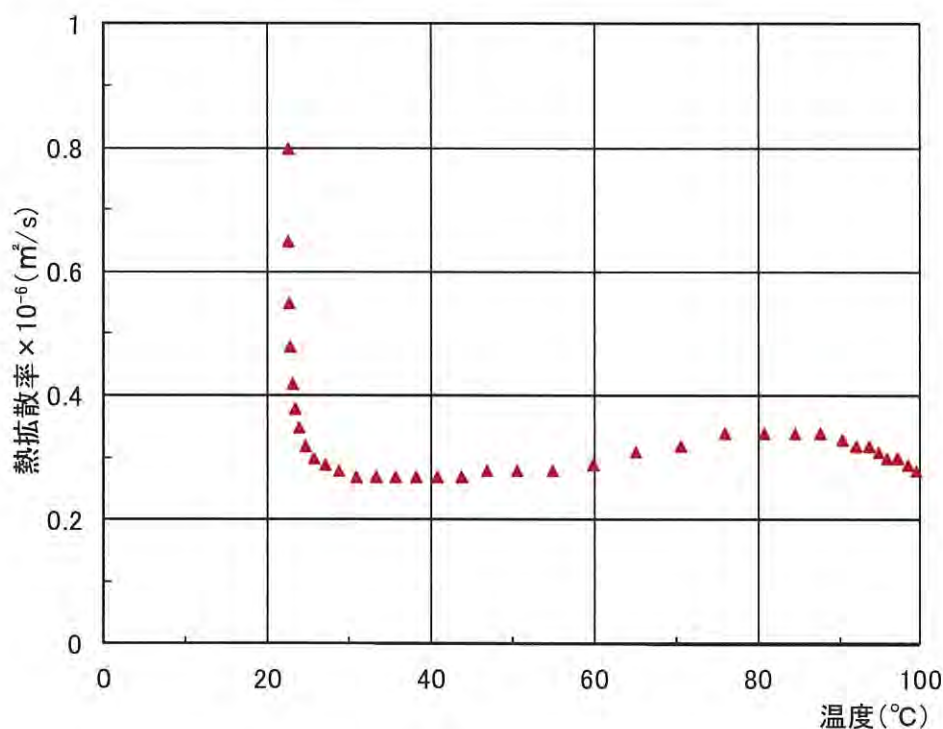


図 4-7-1 推定熱拡散率と温度の関係（試験体 A-⑤の荒壁裏面温度）

4.7.2 推定熱拡散率と加熱面からの距離の関係

試験体A-④～⑥の全ての温度測定データを対象に、前節で決めた方法を用いて熱拡散率 α を推定する（対象温度：80℃、加熱温度：炉内温度の平均値）。図4-7-2に推定熱拡散率と加熱面からの距離の関係を示す。

・加熱面からの距離によって熱拡散率が多少変動するが、小さいばらつきで熱拡散率を得られることが分かった。

加熱面からの距離が小さい位置で低い値をとる原因としては、木舞層部分の熱伝導率が土壁部分と微妙に異なることが考えられるほか、加熱面に近い位置では温度上昇速度が速いため、実験での温度測定間隔30秒では誤差が大きくなる影響が考えられる。そこで、木舞層より加熱側に位置する測定点を除いて平均値 $=0.4 \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s})$ を算出し、木舞層を含んだ土壁総体としての熱拡散率として用いることとする。

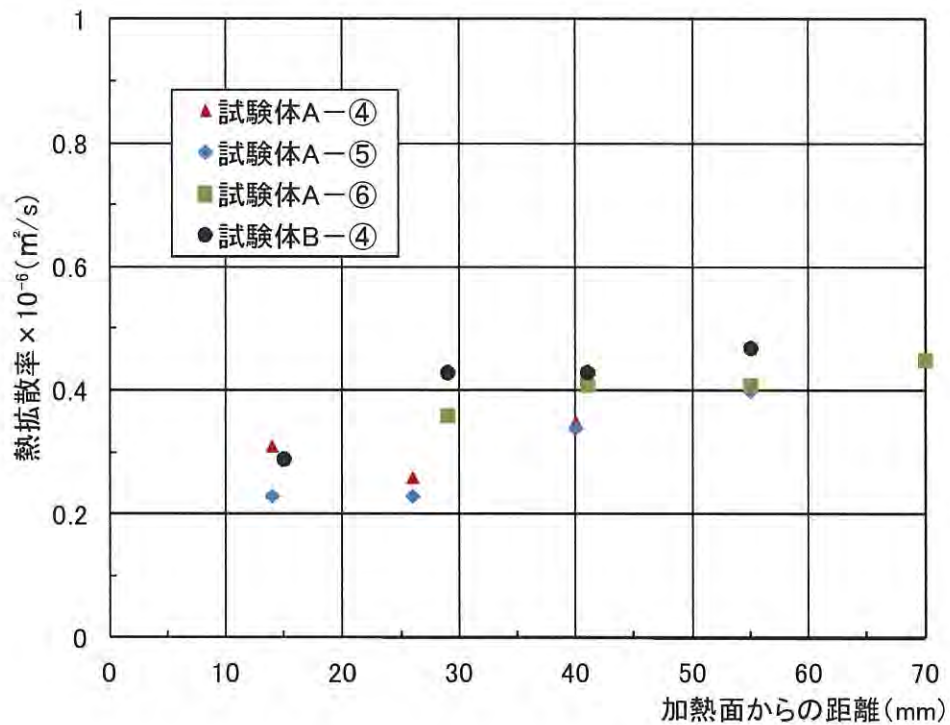


図4-7-2 推定熱拡散率と加熱面からの距離の関係(全試験体)

比較対象として表4-7-1に文献値^{(9) (19) (20) (21)}における土壁および中塗土のみの物性値を示す。中塗土のみの値に対して木舞層を含む土壁総体として見た場合の熱拡散率の値の方が大きくなっており、本研究の考察と一致する。また文献値には幅があるため一概には言えないが、本研究で推定した熱拡散率の値は文献値の範囲内に収まることが分かった。

表4-7-1 既往研究における土壁および中塗土のみの物性値

	乾燥密度 [kg/m ³]	比熱 [kJ/kg K]	熱伝導率 ×10 ⁻³ [kW/m K]	熱拡散率 ×10 ⁻⁶ [m ² /s]
土壁 ^(19, 20)	1280~1700	0.88	0.43~0.58	0.29~0.52
中塗土のみ ^(21, 22)	1670	0.9	0.36	0.23

4.8 既往研究との比較

乾燥壁の温度履歴に温度停滞時間を足し合わせることで、含湿壁の温度履歴を得るアイデアは、古くは鉄骨の耐火被覆による遮熱効果を簡易予測式で表わした Pettersson 氏の研究にも見られる⁽¹⁸⁾。

4.8.1 水分蒸発モデルの比較

既往研究において、水分の蒸発による温度上昇の時間遅れ t_v が、式 4.8.1 と表 4-8-1 を用いて求めるように表わされている。ただし、本研究で示した蒸発時間 t_v と比較しやすい形に単位系を変形して示す。

$$t_v = \eta \cdot \frac{\rho}{\lambda} \cdot \phi \cdot x^2 = 4\eta \cdot \frac{\phi}{C_w} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \quad (4.8.1)$$

t_v : 被覆材に含まれる水分による温度上昇の時間遅れ (分)

λ : 熱伝導率 (kW/mK)

ρ : 被覆材の密度 (kg/m^3)

ϕ : 部材乾燥質量に対する含水率 (kg/kg)

x : 被覆材の厚み (m)

η : $(\rho/\lambda)\phi x^2$ に応じて変化する係数 (表4-10-1参照)

α : 被覆材の熱拡散率 (m^2/s)

表 4-8-1 t_v の係数対応表

$\frac{\rho}{\lambda} \cdot \phi \cdot x^2$ [m ³ K/kW]	4	8	12	16	20	24	28
η	5/4	15/8	25/12	30/16	40/20	50/24	55/28

ここに、本研究で示した蒸発時間 t_v を再掲する。

$$t_v = \left\{ \frac{4.9 \times 10^3}{D} \frac{7}{6} \frac{\phi}{C_w \beta} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \right\}^{6/7} \quad (4.3.4)$$

$T_{f,e}(t_{dw})$: 等価加熱温度 (°C)

T_v : 水分の反応温度 (°C)

D : 比例定数

β : 火災成長率

両者を比較すると、関係式に現れるパラメーターは同じであることが分かる。鉄骨の耐火被覆材に含まれる水分蒸発による時間遅れを求める式が、類似した形を示しているということは、本研究で示す壁体に対する蒸発時間の簡易予測式の妥当性を証明することにもつながると考える。

相違点としては、本研究では蒸発時間を連続的に与えることができ、係数をその都度与える

必要がない。また火災成長率の関数として示している点が異なり、火災時の区画内の温度推移は、火災成長率 β を用いて $\beta t^{1/6}$ で近似されるため、 $\beta = 233$ とする耐火試験での加熱条件下に限らず、性能設計時に予測された火災に対する蒸発時間を得られる本研究の水分蒸発モデルは有益であると考ええる。

4.8.2 温度上昇モデルの比較

ちなみに標準加熱曲線下の、乾燥状態にある材料で被覆された鉄骨の温度上昇を求める式が、耐火被覆材が熱的に薄い場合と厚い場合に分けて表わされている。

熱的に薄い材料で耐火被覆された鉄骨の温度上昇は、被覆材の熱容量を無視して以下の式で表わされている。

$$C_s \rho_s \frac{T(t) - T_0}{dt} = \lambda \frac{(T_{f,ave} - T(t))}{x} \times \frac{H_p}{A} \quad (4.8.2)$$

C_s : 鉄骨の比熱(kJ/kgK)

ρ_s : 鉄骨の密度(kg/m^3)

T_0 : 鉄骨の初期温度($^{\circ}C$)

$T(t)$: 時間 t における鉄骨の温度($^{\circ}C$)

$T_{f,ave}$: 時間 t までの加熱温度の平均値($^{\circ}C$)

λ : 耐火被覆材の熱伝導率(kW/mK)

x : 耐火被覆材の厚さ(m)

A/H_p : 被覆長さ(m)

本研究で対象とする壁体の温度上昇モデルと比較すると、熱伝導を定常状態とみなしているほか、加熱温度も単純に時間 t までの平均温度として計算されており、本研究の温度上昇モデルの方がより精度の高い予測を行えると考ええる。

4.9 まとめ

・前章で提案した一定加熱の条件下における温度上昇時間を求める簡易予測式を用いて、標準加熱曲線下における温度上昇時間を求めるため、乾燥壁の温度上昇時間と蒸発時間に分けて、等価加熱温度を導入した簡易予測式の提案を行った。これらの簡易予測式を実験値および数値解と比較して妥当性の検証を行った。

・その結果、求める温度上昇を変化させても、簡易予測式と実験値はよい一致を見せることが分かった。

・土壁の温度上昇時間に占める蒸発時間の割合について、含水率 3.75%程度でも、温度上昇を $\Delta T(x, t) = 80\text{K}$ と小さく設定する時は、1/3 程度と大きくなることを示した。

・蒸発時間について、実際に考えられる含水率の範囲ではよい一致を見せているが、含水率が非常に大きくなると、加熱面からの距離が大きい位置で誤差が次第に大きくなることがわかった。

・温度上昇を求める簡易予測式から、温度履歴を求める簡易予測手法を示した。そして標準加熱曲線下における土壁の温度上昇時間について、実験値および数値解との比較から簡易予測式の妥当性を示した。

・その結果、ある点での温度上昇が 100°C 以上の領域では、簡易予測式と実験値はよい一致を見せることが分かった。

・ 100°C 以下の領域については、水分蒸発がある時間にはある 1 点でのみ起きているとする水分蒸発モデルに対し、実験では温度停滞が観測されることから、温度履歴に違いが生じることが分かった。

・水分蒸発前の時間帯を乾燥壁として考え、乾燥壁の温度上昇時間の簡易予測式に、土壁の加熱実験の温度測定データを代入して、熱拡散率 α を推定した。

・その結果、温度測定点での水分蒸発前の推定熱拡散率は、加熱初期を除いて温度依存性がほとんど見られないことから、 80°C に達する時間での温度測定データを用いて熱拡散率を推定することにした。

・また推定熱拡散率と加熱面からの距離の関係については、加熱面からの距離によって熱拡散率に多少の変動が見られ、木舞層の影響も考えられたため、土壁総体としての熱拡散率として、木舞層より加熱側の点を除いて平均化した値を用いることにした。

このような簡易予測式の特徴は、どんな物理量がどの程度温度上昇に関連しているかが分かりやすい点にあり、数値解析によらずとも簡易予測式を用いてある程度、温度上昇を予測することができるのは大きな利点である。また関係式として示せることで、実験値をもとに熱拡散率 α の推定も行うことができる。

また課題として、以下の点が挙げられる。

・蒸発時間については含水率を高く設定すると、加熱面からの距離が大きい位置で蒸発時間に差が生じており、土壁に含まれる含水率約 4%程度であれば影響は小さいが、含水率の高い材料については注意する必要がある。

・簡易予測式の適用性について、土壁の温度上昇については妥当性を示すことができたが、他の材料についてはまだ検討を行っていない。

第5章 異なる加熱曲線下における石膏ボードの温度簡易予測式

前章では $\beta t^{1/6}$ で表わされる加熱曲線下における含湿壁の温度簡易予測式の提案を行った。そして標準加熱曲線の加熱条件下における実験値との比較より、土壁に対して簡易予測式を適用することの妥当性を検証した。

しかし、建築物の区画構成部材としての壁体には様々なものがあり、前章で提案した簡易予測式が全てのものに成り立つとは限らない。また火災成長率 β が標準加熱曲線を表わす $\beta = 233$ については、実験値との比較から妥当性の検証を行っているが、その他の火災成長率については実験値が得られておらず、簡易予測式の検証は行っていない。

本章ではその他の材料として石膏ボードに焦点を当て、標準加熱曲線と標準加熱曲線を2割増した加熱条件下で実験を行う。そして実験で得られた考察から、石膏ボードに対する簡易予測式の適用を行い、実験値および数値解析との比較から妥当性を検証する。

5.1 壁体の主要構成材料の抽出

建築物の区画構成部材としての壁体は、湿式工法と乾式工法に分けられる。湿式工法については例として土壁やコンクリート壁が挙げられ、以下の特徴を有する。

- ・厚みを自由に決められること
- ・施工中はもちろん施工後も壁体内に水分を保持すること

これについて前章では、土壁に焦点を当て、加熱面からの距離に応じた温度上昇時間の簡易予測手法を示した。また水分蒸発の影響について、加熱面からの距離と含水率を関数とした蒸発時間の簡易予測手法を示した。

その他の壁体について簡易予測式を適用する場合の対象と課題を整理するため、耐火構造および準耐火構造の壁として大臣認定を取得している間仕切壁について、構造別に分類して表5-1-1に示す。

(a) 工法について

- ・圧倒的に乾式工法の数が多いことが分かる。また乾式工法では、工業製品として予め成形された面材を軸組または受材に固定するため、必要とする厚みを確保するために面材を複層させる場合が多いことが分かる。
- ・それも同一材料を重ね張りしているものもあれば、異種材料を複層しているものもみられ、多いもので片側3層まで複層していることがわかる。
- ・この下地への固定方法の違いにより、内部に中空層が生まれ、ここに断熱材を充填する場合もみられる。

本論文では、単層壁のみの検討しか行っていないが、今後の検討課題として以下の2点を挙げておく。

- ・異種材料が複層する壁体への適用
- ・中空層をもつ壁体への適用

(b) 構成材料について

- ・オレンジで色をつけたものが石膏ボードを材料に含む構造であり、実に9割以上の大臣認定仕様に用いられていることが分かる。

石膏ボードは単価が安い上に、内部に含まれた結晶水により優れた遮熱性能を示すことが知られている。これまで扱ってきた含水率で示される自由水と結晶水は異なるが、どちらも蒸発潜熱による吸熱反応が遮熱性能を向上する主要因だと考えられ、温度上昇モデル+水分蒸発モデルというこれまでの方法が適用できると考えられる。そこで本章では壁体の主要構成材料として石膏ボードに焦点を当てて研究を進めることにする。

5.2 石膏ボードの加熱実験

石膏ボードで構成された間仕切壁の加熱実験を行い、実験結果より簡易予測式を適用する場合の課題について整理を行う。また耐火試験は、標準加熱曲線による単一の加熱条件下での性能を確認するものであるが、実火災の規模は収納可燃物量や開口および空間の大きさによってさまざまに変化し、性能設計で与えられる加熱強度は一様ではない。そこで石膏ボード間仕切壁について、加熱条件の違いが耐火性能に及ぼす影響を調べるため、異なる加熱条件下における加熱実験を行った。

5.2.1 試験体概要

図 5-2-1 に示す、軽量鉄骨下地の両面に石膏ボード (TypeX, 15.9mm) 1 枚張りとした壁体を用いて加熱実験を行った。加熱側石膏ボード裏面、非加熱側石膏ボード表面、非加熱側石膏ボード裏面の 3 断面に、試験体を立面で 4 等分した各面の中央にそれぞれ 4 箇所ずつ熱電対を配して、温度測定を行った。加熱側石膏ボード裏面と非加熱側石膏ボード表面の熱電対については、熱接点をアルミテープで固定し、非加熱側石膏ボード裏面については断熱パッドで覆った。

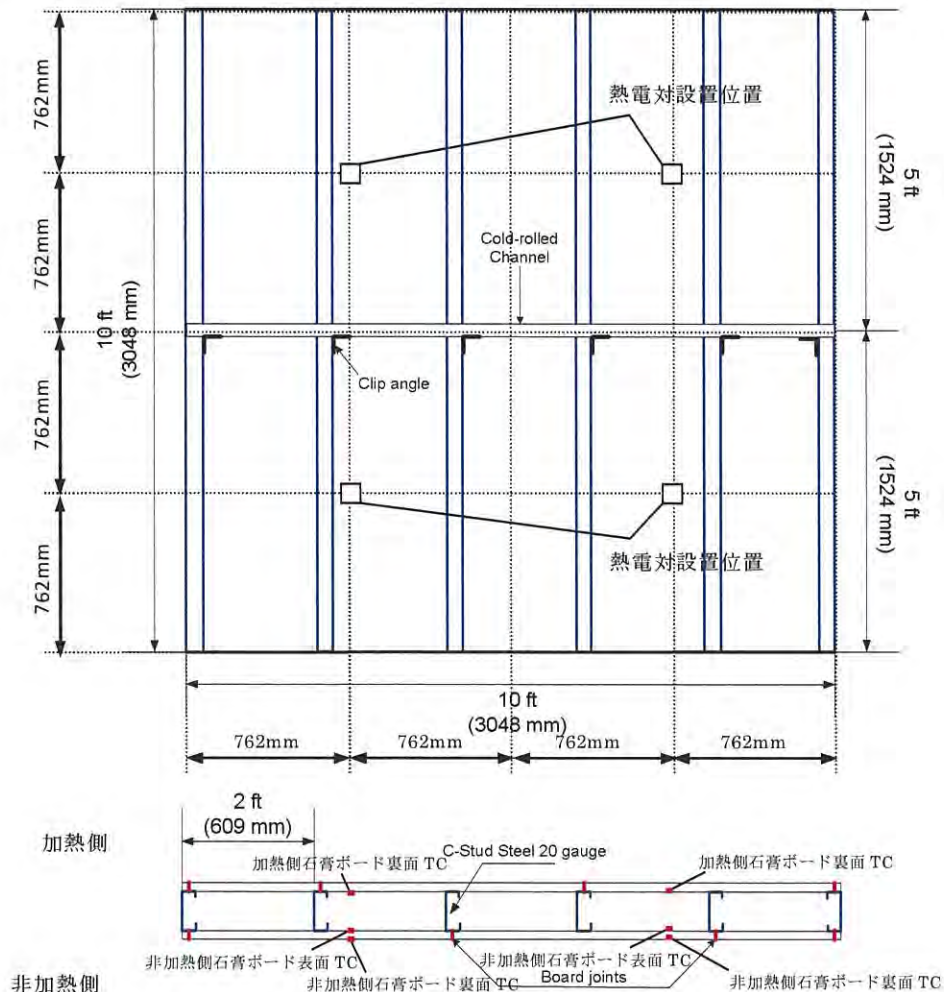


図 5-2-1 石膏ボード単層壁の試験体図

5.2.2 実験方法

加熱条件について、標準加熱曲線と、時間に対する加熱温度が常時標準加熱曲線の2割増となる標準加熱2割増曲線を用いて、それぞれ1体ずつの加熱実験を行った。前者を試験体A、後者を試験体Bとする。

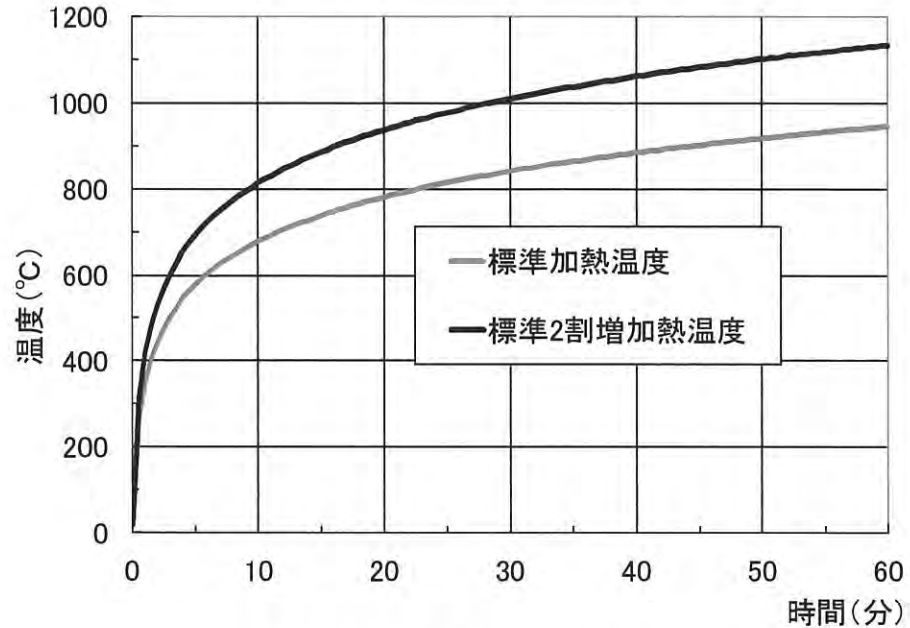


図 5-2-2 加熱温度の比較

5.2.3 実験結果

図 5-2-3 に試験体 A、B の炉内温度の平均値を示す。

- ・ 加熱温度は概ね標準加熱曲線と標準加熱2割増曲線に沿った加熱が行われた。

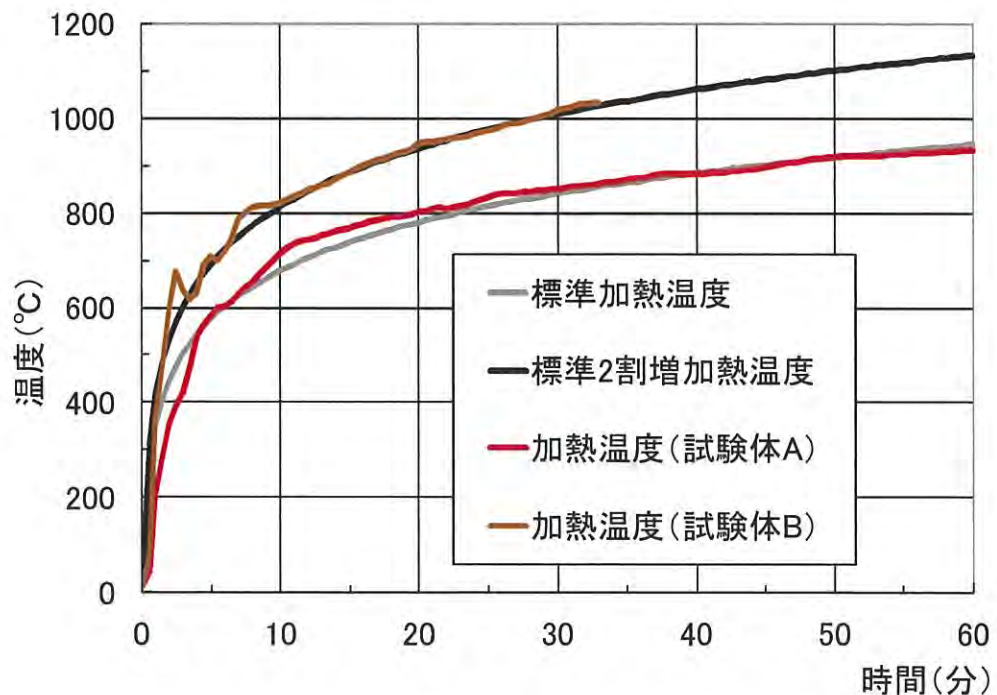


図 5-2-3 炉内平均温度(試験体 A、B)

- 図 5-2-4 に、標準加熱曲線での加熱を行った試験体 A の各断面における平均温度を示す。
- ・加熱側石膏ボード裏面平均温度に着目すると、土壁の際には 100℃ 付近にしか見られなかった温度停滞域が、100℃ 付近と 125℃ 付近で 2 度観測された。
 - ・非加熱側石膏ボード表面や裏面温度においても、100℃ 付近での温度停滞がみられるが、はっきりとした横ばいではなく、また 125℃ 付近では明確な温度停滞は観測されなかった。

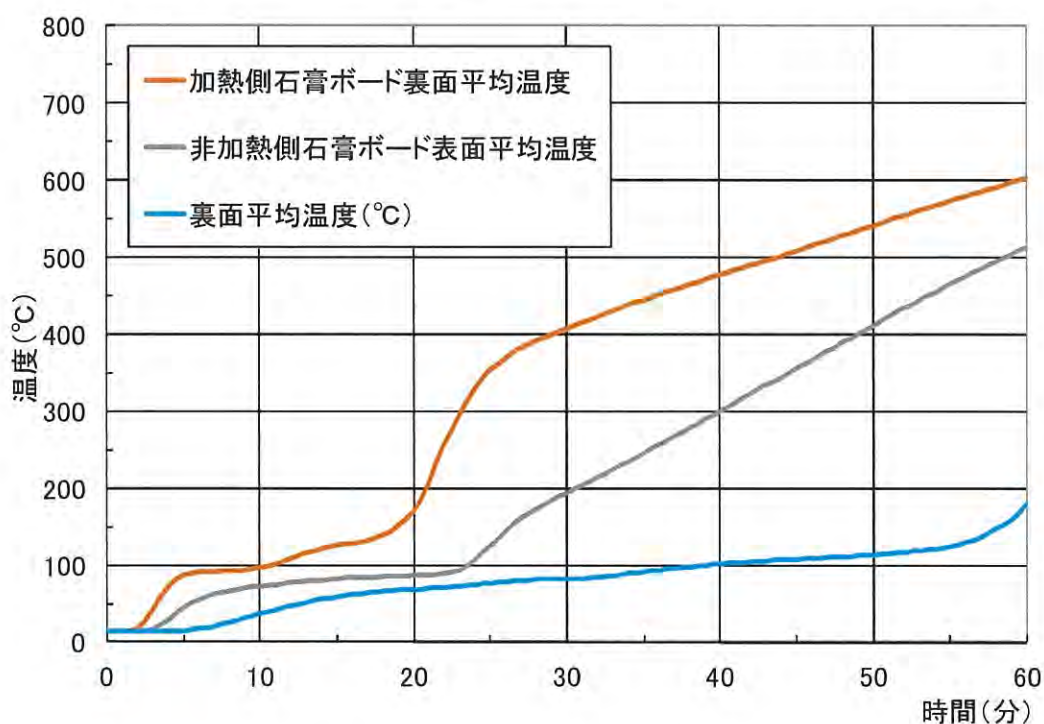


図 5-2-4 実験結果(試験体 A)

図 5-2-5 に、標準加熱 2 割増曲線での加熱を行った試験体 B の各断面における平均温度を示す。なお加熱開始 33 分後に加熱側石膏ボードが脱落したため、加熱を中止している。

- ・加熱側石膏ボード裏面平均温度に着目して試験体 A と比較すると、温度停滞時間が短くなっているほか、温度上昇速度にも違いがみられ、温度停滞前後共に試験体 A に比べて温度上昇速度が速くなっているのがわかる。
- ・これにより初期温度 +180K の温度上昇時間を比較すると、試験体 A が 21 分なのに対し、試験体 B では 18 分と 3 分間の差が生じることが分かる。

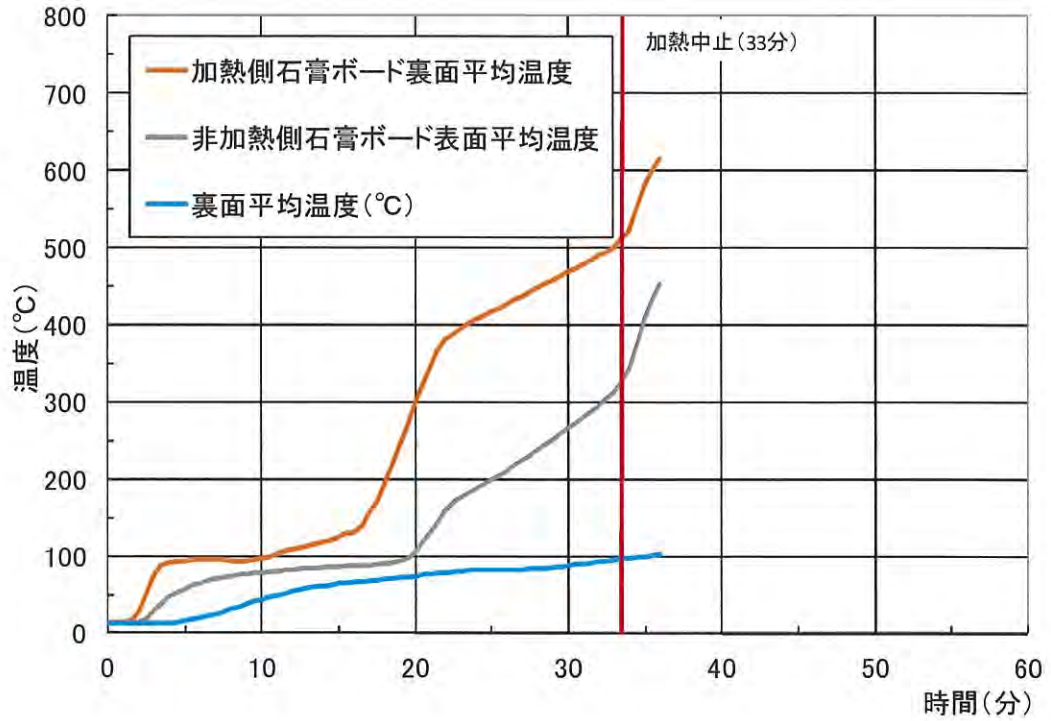
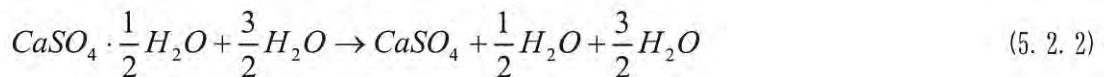
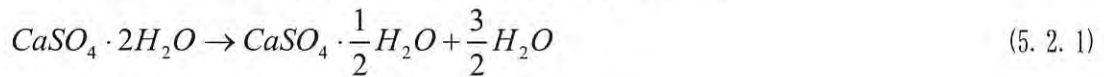


図 5-2-5 実験結果(試験体 B)

5.2.4 考察

石膏ボードは硫酸カルシウム 2 水和物を主成分として、重量分率で 21% の結晶水を含んだ建材である。そしてこの結晶水が耐火性能に大きく影響することが知られている。石膏ボードの結晶水の蒸発は、下式で表わされるように結晶水の分解反応が 2 段階で起こるとする報告があり⁽¹¹⁾、2 度の温度停滞域はこれによるものと考えられる。



加熱強度を上げることで温度上昇時間が短くなることについては、前章で示した簡易予測式が、等価加熱温度 $T_{f,e}(t)$ または火災成長率 β の関数で表わされていることから、火災成長率を大きくすることで、乾燥壁の温度上昇時間、蒸発時間共に小さくなるためであると説明できる。両式を再掲する。

乾燥壁の温度上昇時間の簡易予測式

$$t_{dw} = \left(A_n - B_n \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t_{dw})} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t_{dw})} \leq R_n \right\} \quad (4.2.1)$$

蒸発時間の簡易予測式

$$t_v = \left\{ \frac{4.9 \times 10^3}{D} \frac{7}{6} \frac{\phi}{C_p \beta} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \right\}^{6/7} \quad (4.4.4)$$

5.3 石膏ボード単層壁に対して簡易予測式の改良

実験結果より土壁と同様の温度停滞が観測されたが、石膏ボードは結晶水として水分を含んでいること、また土壁の際には 100℃ 付近にしか見られなかった温度停滞域が、100℃ 付近と 125℃ 付近で 2 度起こることが分かった。

そこで石膏ボード単層壁へ簡易予測式を適用するためには、水分蒸発モデルについて以下の 2 点の改良が必要になる。

- ・水分量を材料の乾燥質量に対する含水率 ϕ の形で与えているが、結晶水として水分を含む場合、水分量の計算に改良が必要となる。
- ・水分が蒸発する温度を 1 つで考えているが、2 段階に分けて蒸発するように改良を行う必要がある。

また石膏ボードをはじめとする乾式工法の場合、工業製品として予め厚みが決められているため、実験値との比較に向いている温度履歴の簡易予測式を中心に考察を行う。

5.3.1 等価含水率の導入

結晶水についても蒸発潜熱による影響のみを考え、結晶水の重量分率を含水率と読み替えて、等価含水率として与える方法を示す。ただし石膏ボードの自由水の含水率は 0.3% 程度であり無視できるとする。

通常、含水率は式 5.3.1 で表わされる。

$$\phi = \frac{w}{W} \quad (5.3.1)$$

w : 水分量(乾燥前 - 乾燥後), W : 壁材の乾燥質量

これに対し、21%の重量分率の結晶水とは式 5.3.2 で表わされる。

$$\frac{w}{W + w} = 0.21 \quad (5.3.2)$$

式 5.3.1, 5.3.2 より石膏ボードの結晶水の等価含水率 ϕ_e を求める。

$$\phi_e = \frac{0.21W}{0.79} \times \frac{1}{W} = 0.27 \quad (5.3.3)$$

結晶水のように、含水率ではなく重量分率で水分量が示されている場合、以上のようにして求めた等価含水率を用いる。

5.3.2 蒸発時間の簡易予測式

結晶水はそれぞれの温度に達してから一斉に蒸発すると考え、結晶水が失われるときの潜熱が水分の蒸発潜熱と同じであると仮定する。結晶水の蒸発温度を T_{v1} と T_{v2} の2段階として、それぞれの温度で蒸発する割合を γ 、 $1-\gamma$ とすると、それぞれの温度で蒸発する水分量に対する蒸発時間 t_{v1} 、 t_{v2} は、等価含水率を用いて以下のように表わすことができる。

T_{v1} で蒸発する水分量に対する蒸発時間

$$t_{v1} = \left\{ \frac{4.9 \times 10^3}{D} \frac{7}{6} \frac{\gamma \phi_e}{C_p \beta} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \right\}^{6/7} \quad (5.3.4)$$

T_{v2} で蒸発する水分量に対する蒸発時間

$$t_{v2} = \left\{ \frac{4.9 \times 10^3}{D} \frac{7}{6} \frac{(1-\gamma)\phi_e}{C_p \beta} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \right\}^{6/7} \quad (5.3.5)$$

ここに、

T_{v1} : 1段階目の結晶水の蒸発温度 (°C)

T_{v2} : 2段階目の結晶水の蒸発温度 (°C)

$\gamma\phi_e$: T_{v1} で反応する水分率 (kg/kg)

$(1-\gamma)\phi_e$: T_{v2} で反応する水分率 (kg/kg)

実験結果より、石膏ボードの蒸発温度と等価含水率を以下のように与える。

$$T_{v1} = 100$$

$$T_{v2} = 125 \quad (5.3.6)$$

$$\phi_e = 0.27$$

また式 5.2.1 より、1段階目の反応割合を以下のように与える。

$$\gamma = \frac{3}{2} \div 2 = 0.75 \quad (5.3.7)$$

5.3.3 石膏ボード単層壁の温度上昇の簡易予測式

前章では含湿壁の温度履歴について、次の3つのステップで求める手順を示した。

(STEP1) 蒸発が完了する時間 $t = t_{dw,100} + t_v$ を求める。

(STEP2) 蒸発完了後の時間帯 $t > t_{dw,100} + t_v$ における温度履歴を求める。

(STEP3) 蒸発完了前の時間帯 $t < t_{dw,100} + t_v$ における温度履歴を求める。

これに対し、2段階で反応する結晶水を含む石膏ボード単層壁の温度履歴を求める場合、基本的な手順は変わらないが、前節で示した条件に対応して、以下の手順をとる。STEP1'～STEP3'までは前章で示したSTEP1～STEP3の手順に対応しており、STEP2'では $t_v = t_{v1} + t_{v2}$ として、STEP3'では $t_v = t_{v1}$ と置き換えることで同じ手法を用いることができる。STEP4'に関してはここで新たに提案を行う。

(STEP1') 各温度で蒸発する水分量の蒸発完了時間 $t_1 = t_{dw,100} + t_{v1}$ 、 $t_2 = t_{dw,125} + t_{v1} + t_{v2}$ を求める。

(STEP2') 2度目の蒸発完了後の時間帯 $t > t_2$ における温度履歴を求める。

(STEP3') 1度目の蒸発完了前の時間帯 $t < t_1$ における温度履歴を求める。

(STEP4') 1度目の蒸発完了後から2度目の蒸発完了前までの時間帯 $t_1 \leq t \leq t_2$ における温度履歴を求める。

STEP1'～STEP3'までの手順を図5-3-1、5-3-2に示す。

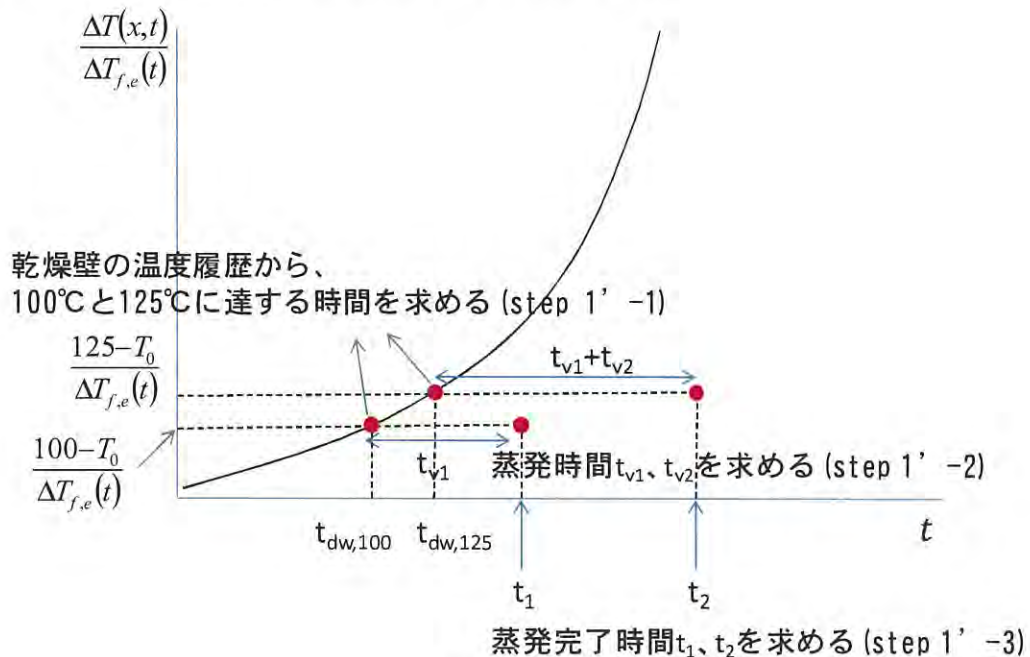


図 5-3-1 温度履歴の算出(STEP1'の概念図)

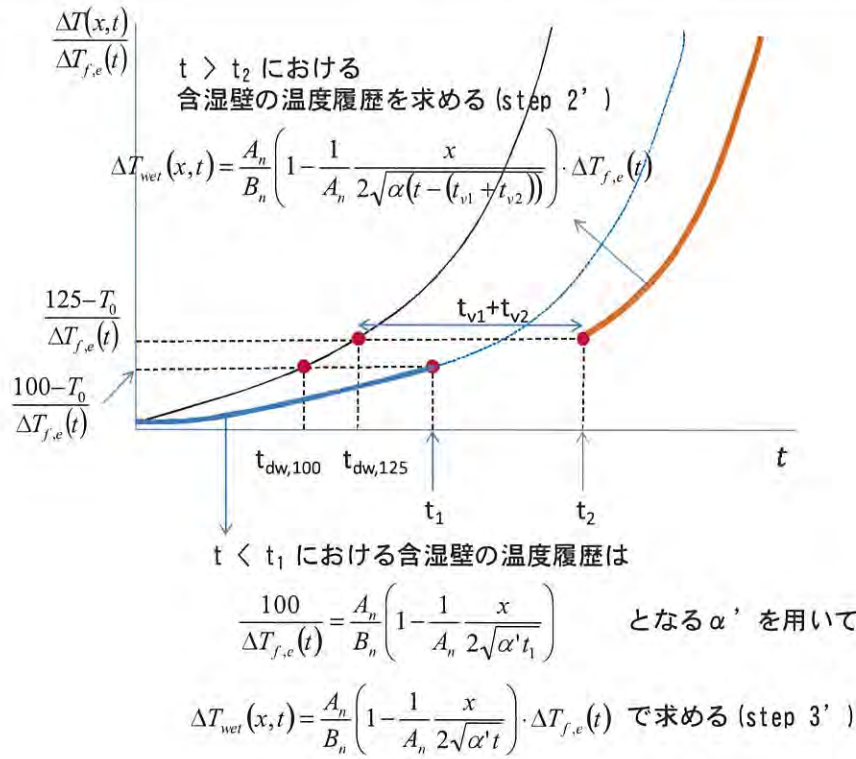


図 5-3-2 温度履歴の算出(STEP2'、3' の概念図)

ここで、STEP4' の $t_1 \leq t \leq t_2$ における温度履歴については、以下のように求める。

・時間 t_1 における温度上昇 $(100 - T_0) / \Delta T_{f,e}(t)$ を起点にして、時間 t_2 までの温度上昇 $(125 - 100) / \Delta T_{f,e}(t)$ が $t_2 - t_1$ の時間で達成されるために必要な熱拡散率 α_2' を乾燥壁の温度履歴から求める。ただし、等価加熱温度を求めるための時間については t_2 を用いる。

$$\frac{125 - 100}{\Delta T_{f,e}(t_2)} = \frac{A_n}{B_n} \left(1 - \frac{1}{A_n \cdot 2\sqrt{\alpha_2'(t_2 - t_1)}} \right) \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{125 - 100}{\Delta T_{f,e}(t_2)} \leq R_n \right\} \quad (5.3.8)$$

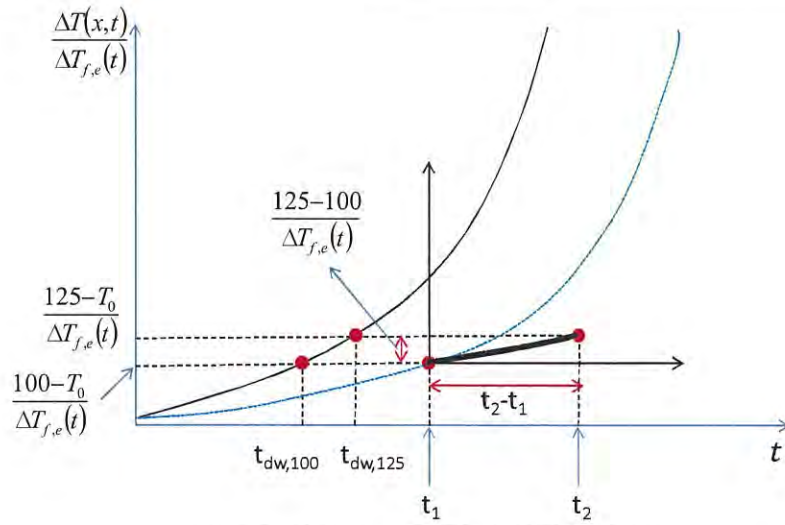
α_2' について整理して

$$\alpha_2' = \left(A_n - B_n \frac{125 - 100}{\Delta T_{f,e}(t_2)} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{(t_2 - t_1)}} \right)^2 \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{125 - 100}{\Delta T_{f,e}(t_2)} \leq R_n \right\} \quad (5.3.9)$$

求めた熱拡散率 α_2' と $t = t - t_1$ を乾燥壁の温度履歴の簡易予測式に代入して、起点とした時間 t_1 における温度上昇 $(100 - T_0)$ を足し合わせて温度履歴を求めることができる。と考える。

$$\Delta T_{wer}(x, t) = \frac{A_n}{B_n} \left(1 - \frac{1}{A_n \cdot 2\sqrt{\alpha_2'(t - t_1)}} \right) \cdot \Delta T_{f,e}(t) + (100 - T_0) \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T_{wer}(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t)} \leq R_n \right\} \quad (5.3.10)$$

STEP4' の算定手順を図 5-3-3 に示す。



$t_1 < t < t_2$ における含湿壁の温度履歴は

$$\frac{125-100}{\Delta T_{f,e}(t_2)} = \frac{A_n}{B_n} \left(1 - \frac{1}{A_n} \frac{x}{2\sqrt{\alpha'_2(t_2-t_1)}} \right) \text{ となる } \alpha' \text{ を用いて}$$

$$\Delta T_{wet}(x,t) = \frac{A_n}{B_n} \left(1 - \frac{1}{A_n} \frac{x}{2\sqrt{\alpha'_2(t-t_1)}} \right) \cdot \Delta T_{f,e}(t) + (100-T_0) \text{ で求める (step 4')}$$

図 5-3-3 温度履歴の算出(STEP4' の概念図)

5.4 石膏ボード単層壁について妥当性の検証

石膏ボード単層壁の温度履歴の簡易予測式について、数値解および実験値との比較を行い、妥当性を検証する。

5.4.1 計算条件と実験条件

(0) 共通条件

表 5-4-1 に示す文献値⁽¹¹⁾ から得た石膏ボードの物性値を用いて、 $\beta = 233$ とした標準加熱曲線と、 $\beta = 280$ となる標準加熱曲線の 2 割増で加熱した場合について、計算対象位置 $x = 15.9\text{mm}$ における温度履歴を求める。

表 5-4-1 石膏ボードの物性値

結晶水		乾燥密度 [kg/m ³]	比熱 [kJ/kg K]	熱伝導率 × 10 ⁻³ [kW/m K]
重量分率	蒸発温度 [°C]			
0.21	100/125	770	1.13	0.225

(a) 実験条件

実験値は、標準加熱曲線で加熱した試験体 A と標準加熱 2 割増曲線で加熱した試験体 B について、加熱側石膏ボード裏面温度を対象とした。各測定点における初期温度の平均値は 14°C であった。

(b) 簡易予測式

石膏ボードの等価含水率を 27% とし、1 段階目の反応割合を 0.75 とした。

比例定数 D は式 3.6.9 を用いて求めた。

$$D = 0.049 \log_e \phi + 0.8 \quad (3.6.9)$$

(c) 数値解析

初期温度 20°C とし、加熱側表面の環境条件は表 5-4-2 を用い、非加熱側境界条件は半無限固体近似とした。解析時間刻みを 1 秒として節点距離は 1mm で行った。等価含水率 $\phi_e = 27\%$ 、反応割合 $\gamma = 0.75$ とする。

表 5-4-2 環境条件

	熱伝達 [kW/m ² K]	輻射伝達率
加熱側	0.03	0.8
外気側	0.01	0.8

5.4.2 計算結果と実験値の比較

(a) 簡易予測式

まず、 $\beta=233$ の標準加熱曲線下における温度履歴の計算結果を示す。

(STEP1') 各温度で蒸発する水分量の蒸発完了時間を求める。

・まず乾燥壁の温度履歴を求める。

前掲した式 4.7.4 を用いて、時間 t_n における温度上昇を求める。

$$t_n = \left\{ \frac{1}{L_n} \cdot \frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right\}^2 \text{ のとき、 } \Delta T_{dw}(x, t) = R_n \cdot \frac{6}{7} \beta t_n^{1/6} \quad (4.7.4)$$

$$t_0 = \left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{0.0159}{2\sqrt{0.259 \times 10^{-6}}} \right\}^2 = 61 \text{ (s) のとき、 } \Delta T_{dw}(x, t) = 0 \text{ (K)}$$

$$t_1 = \left\{ \frac{1}{1.5} \cdot \frac{0.0159}{2\sqrt{0.259 \times 10^{-6}}} \right\}^2 = 108 \text{ (s) のとき、 } \Delta T_{dw}(x, t) = 0.05 \cdot \frac{6}{7} 233 \cdot 108^{1/6} = 22 \text{ (K)}$$

$$t_2 = \left\{ \frac{1}{1.2} \cdot \frac{0.0159}{2\sqrt{0.259 \times 10^{-6}}} \right\}^2 = 169 \text{ (s) のとき、 } \Delta T_{dw}(x, t) = 0.1 \cdot \frac{6}{7} 233 \cdot 169^{1/6} = 47 \text{ (K)}$$

$$t_3 = \left\{ \frac{1}{0.9} \cdot \frac{0.0159}{2\sqrt{0.259 \times 10^{-6}}} \right\}^2 = 301 \text{ (s) のとき、 } \Delta T_{dw}(x, t) = 0.2 \cdot \frac{6}{7} 233 \cdot 301^{1/6} = 103 \text{ (K)}$$

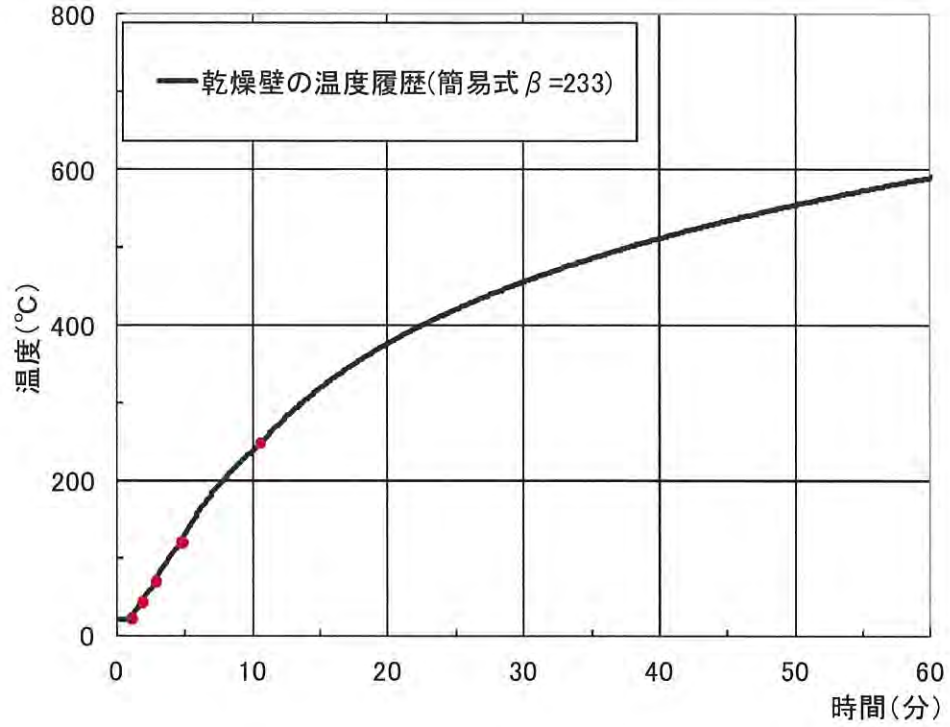
$$t_4 = \left\{ \frac{1}{0.6} \cdot \frac{0.0159}{2\sqrt{0.259 \times 10^{-6}}} \right\}^2 = 678 \text{ (s) のとき、 } \Delta T_{dw}(x, t) = 0.4 \cdot \frac{6}{7} 233 \cdot 678^{1/6} = 236 \text{ (K)}$$

中間の時間帯については、前掲した式 4.7.1 を用いて求め、図 5-4-1 に黒線で示す。

$$\Delta T_{dw}(x, t) = \frac{A_n}{B_n} \left(1 - \frac{1}{A_n} \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \cdot \Delta T_{f,e}(t) \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t)} \leq R_n \right\} \quad (4.7.1)$$

求めた乾燥壁の温度履歴から、100℃と125℃に到達する時間 $t_{dw, 100}$ 、 $t_{dw, 125}$ を読み取る。

$$\begin{aligned} t_{dw, 100} &= 228 \text{ (s)} \\ t_{dw, 125} &= 294 \text{ (s)} \end{aligned} \quad (5.4.1)$$


 図 5-4-1 乾燥壁の温度履歴 ($\beta = 233$ 標準加熱曲線)

・次に前掲した式 4.4.4 を用いて蒸発時間 t_{v1} 、 t_{v2} を求める。

$$t_v = \left\{ \frac{4.9 \times 10^3}{D} \frac{7}{6} \frac{\phi}{C_p \beta} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \right\}^{6/7} \quad (4.4.4)$$

$$t_{v1} = \left\{ \frac{4.9 \times 10^3}{0.91} \frac{7}{6} \frac{0.75 \cdot 0.27}{1.13 \cdot 233} \cdot \left(\frac{0.0159}{2\sqrt{0.258 \times 10^{-6}}} \right)^2 \right\}^{6/7} = 429 \text{ (s)}$$

$$t_{v2} = \left\{ \frac{4.9 \times 10^3}{0.91} \frac{7}{6} \frac{0.25 \cdot 0.27}{1.13 \cdot 233} \cdot \left(\frac{0.0159}{2\sqrt{0.258 \times 10^{-6}}} \right)^2 \right\}^{6/7} = 167 \text{ (s)}$$

・これらを足し合わせて、蒸発完了時間 t_1 、 t_2 を求める。

$$t_1 = 228 + 429 = 657 \text{ (s)}$$

$$t_2 = 294 + 429 + 167 = 890 \text{ (s)}$$

(STEP2') 2 度目の蒸発完了後の時間帯 $t > t_2$ における温度履歴を前掲した式 4.8.2 を用いて求める。

$$\Delta T_{wet}(x, t) = \frac{A_n}{B_n} \left(1 - \frac{1}{A_n} \frac{x}{2\sqrt{\alpha(t-t_{v2})}} \right) \cdot \Delta T_{f,e}(t-t_{v2}) \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T_{wet}(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t-t_{v2})} \leq R_n \right\} \quad (4.8.2)$$

$$\Delta T_{wet}(x, t) = \frac{A_n}{B_n} \left(1 - \frac{1}{A_n} \frac{x}{2\sqrt{\alpha(t-167)}} \right) \cdot \Delta T_{f,e}(t - t_{v2}) \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T_{wet}(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t-167)} \leq R_n \right\}$$

(STEP3') 1度目の蒸発完了前の時間帯 $t < t_1$ における温度履歴を求める。

・前掲した式 4.8.4 に蒸発完了時間 t_1 と温度上昇 80K を代入して、熱拡散率 α' を求める。

$$\alpha' = \left(A_n - B_n \frac{80}{\Delta T_{f,e}(t_1)} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{t_1}} \right)^2 \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{80}{\Delta T_{f,e}(t_1)} \leq R_n \right\} \quad (5.4.2)$$

$$\alpha' = \left(1.5 - 3 \frac{80}{589} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{0.0159}{2\sqrt{657}} \right)^2 = 0.08 \times 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

・前掲した式 4.8.5 を用いて温度履歴を求める。

$$\Delta T_{wet}(x, t) = \frac{A_n}{B_n} \left(1 - \frac{1}{A_n} \frac{x}{2\sqrt{\alpha't}} \right) \cdot \Delta T_{f,e}(t) \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T_{wet}(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t)} \leq R_n \right\} \quad (4.8.5)$$

(STEP4') 1度目の蒸発完了後から2度目の蒸発完了前までの時間帯 $t_1 \leq t \leq t_2$ における温度履歴を求める。

・前掲した式 5.3.9 を用いて熱拡散率 α_2' を求める。

$$\alpha_2' = \left(A_n - B_n \frac{125-100}{\Delta T_{f,e}(t_2)} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{(t_2-t_1)}} \right)^2 \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{125-100}{\Delta T_{f,e}(t_2)} \leq R_n \right\} \quad (5.3.9)$$

$$\alpha_2' = \left(2 - 10 \frac{125-100}{619} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{233}} \right)^2 = 0.11 \times 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

・前掲した式 5.3.10 を用いて温度履歴を求める。

$$\Delta T_{wet}(x, t) = \frac{A_n}{B_n} \left(1 - \frac{1}{A_n} \frac{x}{2\sqrt{\alpha_2'(t-t_1)}} \right) \cdot \Delta T_{f,e}(t) + (100 - T_0) \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T_{wet}(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t)} \leq R_n \right\} \quad (5.3.10)$$

$$\Delta T_{wet}(x, t) = \frac{A_n}{B_n} \left(1 - \frac{1}{A_n} \frac{x}{2\sqrt{\alpha_2'(t-657)}} \right) \cdot \Delta T_{f,e}(t) + (100 - T_0) \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T_{wet}(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t)} \leq R_n \right\}$$

(b) 簡易予測式と実験結果および数値解の比較

図 5-4-2 に、標準加熱曲線下の石膏ボード単層壁の温度履歴を示す。実験値を黒線で、数値解を点線で、簡易予測式を橙の実線で示す。

まず 100℃以下での温度履歴に注目する。

- ・簡易予測式と実験値を比較すると、土壁の場合と同じく、実験結果の方が温度上昇は速く、100℃に達してから温度停滞が観測されるため、差異が生じていることが分かる。
- ・これに対し、水分蒸発がある時間ではある 1 点でのみ起きていると考える簡易予測式と数値解は良い一致を見せることが分かる。

次に 100℃以上での温度履歴に注目する。

- ・簡易予測式と数値解では、2 段階目の蒸発温度 125℃の前後で温度上昇速度が変化するの分かる。これまで水分蒸発の影響は、温度上昇を遅延する蒸発時間としてのみ取り扱ってきたが、温度上昇速度にも影響を与えられと考える。
- ・温度上昇が 200℃以上になると、実験結果の温度上昇速度に対して、数値解および簡易予測式の温度上昇速度が緩やかになり差が生じることが分かる。

実験では加熱側石膏ボードの裏面に中空層が存在しており、内部の空気が暖められるにつれ断熱の影響が大きくなるためだと考えられる。

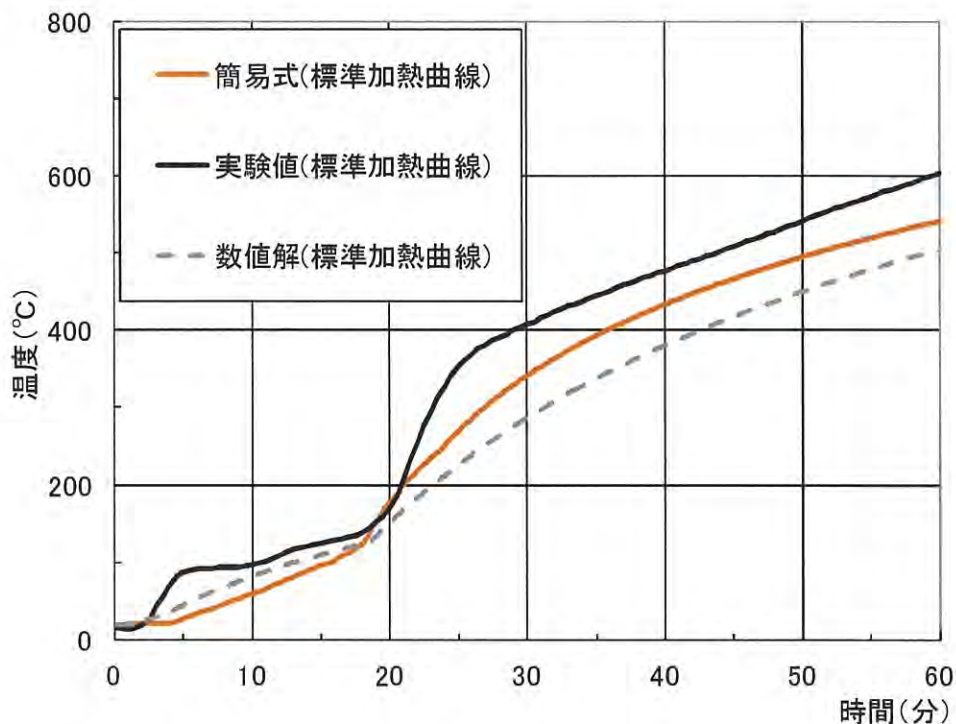


図 5-4-2 非加熱側石膏ボード裏面の温度履歴(標準加熱曲線下)
(簡易予測式、数値解、実験値の比較)

そこで、中空部と非加熱側石膏ボードを再現して数値解析を行った場合の、加熱側石膏ボード裏面温度の温度履歴を、図 5-4-3 に赤の点線で示す。中空部は式 5.3.11 に示すように、対流と輻射で伝達される熱により、空気層の温度が上昇すると仮定して計算した。

$$\rho_a C_p \Delta x \frac{T_{void}^{j+1} - T_{void}^j}{\Delta t} = h_i (T_{w1,n} - T_{void}) + \varepsilon_i \sigma (T_{w1,n}^4 - T_{void}^4) - \{ h_o (T_{void} - T_{w2,1}) + \varepsilon_o \sigma (T_{void}^4 - T_{w2,1}^4) \} \quad (5.3.11)$$

ここに

$\rho_a = 1.2$: 空気の密度 (kg/m^3)

$C_p = 1$: 空気の比熱 (kJ/kgK)

$\Delta x = 0.089$: 中空部の厚さ (m)

T_{void} : 中空部の温度 (K)

$T_{w1,n}$: 加熱側石膏ボード裏面温度 (K)

$T_{w2,1}$: 非加熱側石膏ボード表面温度 (K)

$h_i = 0.01$: 加熱側石膏ボード側の対流熱伝達率 (kW/m^2K)

$h_o = 0.01$: 非加熱側石膏ボード側の対流熱伝達率 (kW/m^2K)

$\varepsilon_i = 0.64$: 加熱側石膏ボード側の輻射伝達率

$\varepsilon_o = 0.64$: 非加熱側石膏ボード側の輻射伝達率

中空部の温度が上昇するにつれて、非加熱側石膏ボードの裏面の温度上昇が速くなることが分かった。

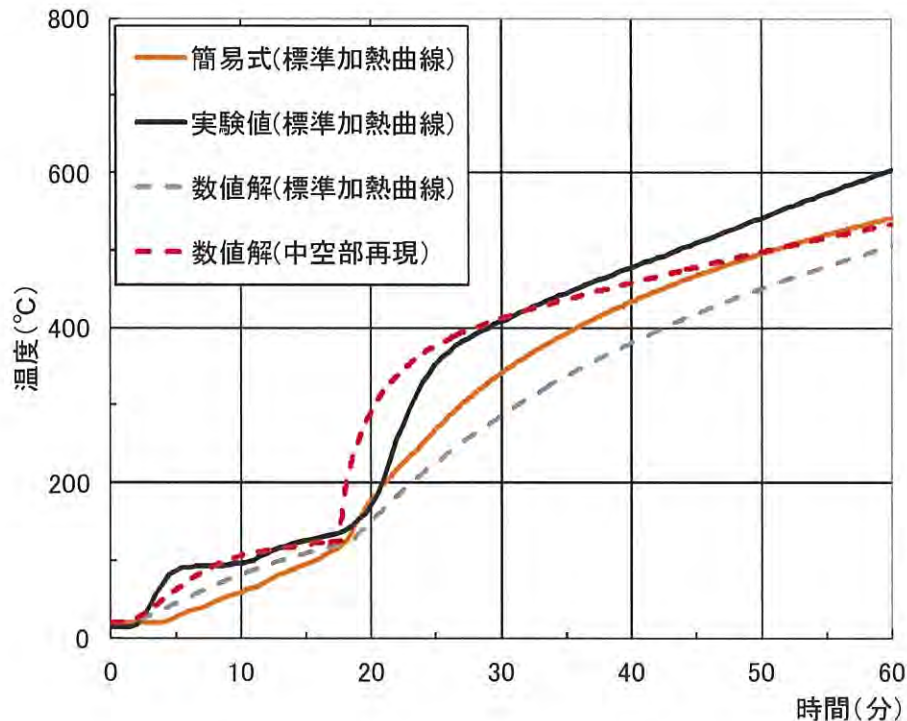


図 5-4-3 非加熱側石膏ボード裏面の温度履歴(標準加熱曲線下)
(簡易予測式、中空部を再現した数値解、実験値の比較)

図5-4-4に、標準加熱2割増曲線下の石膏ボード単層壁の温度履歴を示す。実験値を黒線で、数値解を点線で、簡易予測式を橙の実線で示す。

- ・加熱強度を上げたことで、温度上昇速度が速くなり温度停滞時間も短くなる傾向を簡易予測式でも示すことができた。
- ・標準加熱曲線下の温度履歴と同じく、200℃以上になると実験結果と簡易予測式の違いが生じることが分かった。

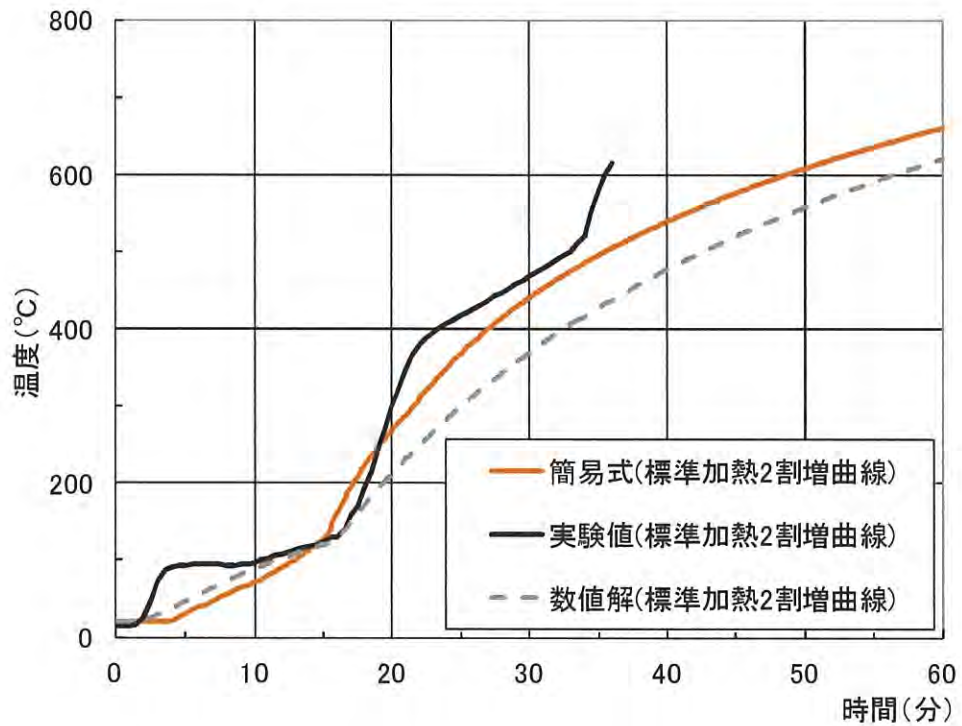


図5-4-4 非加熱側石膏ボード裏面の温度履歴(標準加熱2割増曲線下)
(簡易予測式、数値解、実験値の比較)

5.5 推定熱拡散率と文献値の比較

試験体 A の加熱側石膏ボード裏面温度の温度測定データを例にして、前掲した式 4.9.1 を用いて熱拡散率を推定する。ただし対象温度を水分蒸発の影響を考慮して 100℃ 以下とした。また加熱温度 $T_f(t)$ に時間 t における炉内温度の平均値を与えて算出した。

$$\alpha = \left(A_n - B_n \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t_{dw})} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{t_{dw}}} \right)^2 \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t_{dw})} \leq R_n \right\} \quad (4.9.1)$$

図 5-5-1 に推定した熱拡散率 α とその時の温度との関係を示す。

- ・加熱初期と 100℃ 付近を除いて式 5.2.1 から推定される熱拡散率は概ね一定の値をとることがわかった。100℃ 付近で少し減少するのは水分蒸発が少しずつ始まってきている影響だと考えられる。
- ・土壁と同様 80℃ で熱拡散率を推定すると、 $0.28 \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s})$ となり、文献値の値 $0.259 \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s})$ と近い値をとることが分かる。

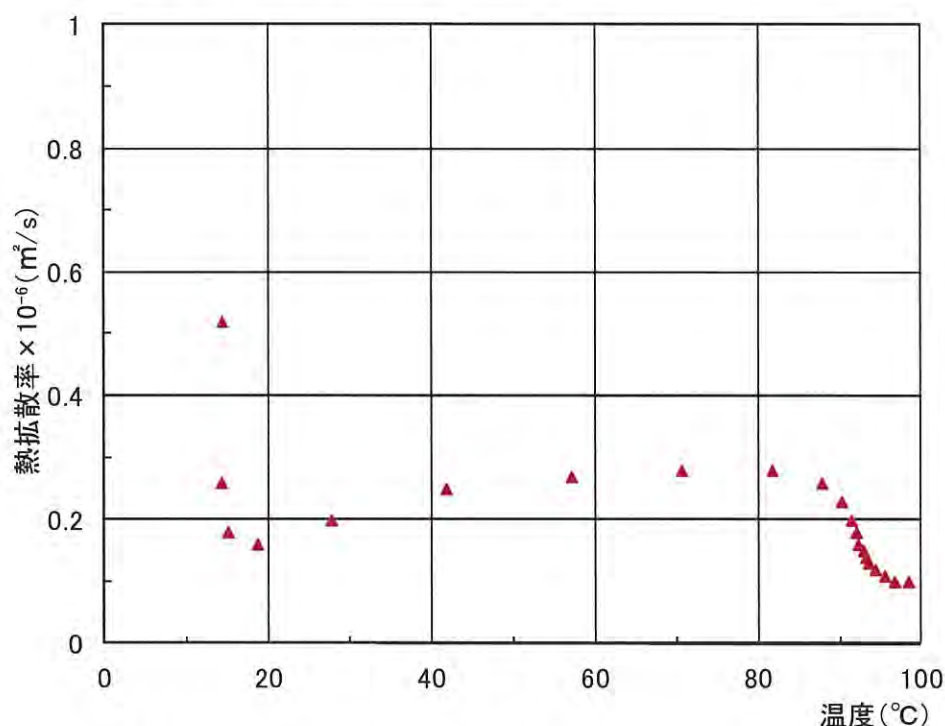


図 5-5-1 推定熱拡散率と温度の関係(試験体 A の非加熱側 GB 裏面温度測定値)

5.6 まとめ

- ・石膏ボードの加熱実験を行い、土壁の際には 100℃付近にしか見られなかった温度停滞域が、100℃付近と 125℃付近で2度見られること、加熱強度を上げることで、温度停滞の時間が短くなるのに加え、温度上昇速度が速くなることを明らかにした。
- ・石膏ボードの温度履歴を求めるために、結晶水の重量分率を等価含水率として与える方法を示した。また水分の反応温度を複数もつ材料に対して、蒸発時間の計算方法を改良した。
- ・石膏ボード単層壁について、標準加熱曲線と標準2割増加加熱曲線で加熱した場合における温度履歴について、実験値と簡易予測式、数値解析結果による比較を行った。
- ・その結果、加熱条件の違いによる温度停滞時間と温度上昇速度の変化について、簡易予測式でも予測することができた。また温度上昇が 200℃以下の領域では、実験値との良い一致をみせ、簡易予測式が石膏ボードにも適用できることを示した。
- ・しかし、200℃以上になると実験結果と簡易予測式の間に差が生じることが分かり、これは中空層による断熱の影響が大きくなるためであると考えた。
- ・石膏ボードのように等価含水率で 27%と多くの水分量を含む場合は、水分蒸発の前後で温度上昇速度が変化することが分かり、水分蒸発の影響が蒸発時間として温度上昇を遅延する以外に、温度上昇速度にも影響を与えられられる。

第6章 加熱温度一定の条件下における含湿壁の非定常温度分布

これまで含湿壁の温度上昇時間は、乾燥壁と含湿壁が蒸発温度に達するまでの温度上昇時間の差を蒸発時間として、時間軸で足し合わせることで、含湿壁の温度上昇を予測してきた。この場合、蒸発完了後の温度上昇速度は乾燥壁と含湿壁で変化しないことになる。

しかし多くの水分量を含む場合は、水分蒸発の前後で温度上昇速度が変化することが分かり、水分蒸発の影響が蒸発時間として温度上昇を遅延する以外に、温度上昇速度にも影響を与えると考えられ、内部の温度分布が変化していることを示唆している。

また水分蒸発モデルにおいて、蒸発到達点への伝導熱流束が正確には分からなかったため、蒸発到達点での温度と加熱側表面温度を直線で結んだ温度勾配を仮定して、比例定数 D を掛け合わせたものから、蒸発到達点における伝導熱流束を求めてきた。これは内部の温度分布が得られればより正確な予測ができると考えられる。

そこで本章では、含湿壁の温度分布の時間変化（非定常温度分布と呼ぶ）について検討を行なう。簡単のため加熱温度一定の条件下について考察を行う。

6.1 乾燥壁の非定常温度分布から比例定数の算出

壁体内の温度分布から伝導熱流束を予測することを考える。

(a) 乾燥壁の温度上昇を求める簡易予測式（式 6.1.1）について、 t を固定すればある時間 t における温度分布を求めることができる。

$$\Delta T(x, t) = \frac{A_n}{B_n} \left(1 - \frac{1}{A_n} \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \cdot \Delta T_f \quad R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \leq R_n \quad (6.1.1)$$

ここに

$\Delta T(x, t) = T(x, t) - T_0$: 乾燥壁の温度上昇 (K)

$\Delta T_f = T_f - T_0$: 加熱側表面での温度上昇 (K)

t : 時間 (s)

x : 加熱面からの距離 (m)

α : 熱拡散率 (m^2/s)

n : 近似番号

R_{n-1}, R_n : 近似番号 n を適用する無次元温度の下限と上限

L_n, L_{n-1} : 近似番号 n を適用する無次元数 $1/2F_o^{1/2}$ の下限と上限

A_n, B_n は、 $R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \leq R_n$ または $L_n \leq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} < L_{n-1}$ に応じて変化する係数 (表6-1-1参照)

表 6-1-1 簡易予測式の係数対応表

n	A_n	B_n	適用範囲			適用範囲		
			L_{n-1}	$1/2F_0^{1/2}$	L_n	R_{n-1}	無次元温度	R_n
1	2	10	2.0	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$	≥ 1.5	0	$\leq \frac{\Delta T(x,t)}{\Delta T_f}$	≤ 0.05
2	1.8	6	1.5	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$	≥ 1.2	0.05	$\leq \frac{\Delta T(x,t)}{\Delta T_f}$	≤ 0.1
3	1.5	3	1.2	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$	≥ 0.9	0.1	$\leq \frac{\Delta T(x,t)}{\Delta T_f}$	≤ 0.2
4	1.2	1.5	0.9	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$	≥ 0.6	0.2	$\leq \frac{\Delta T(x,t)}{\Delta T_f}$	≤ 0.4
5	1	1	0.6	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$	≥ 0	0.4	$\leq \frac{\Delta T(x,t)}{\Delta T_f}$	≤ 1.0

式 6. 1. 1 は、以下の式で示される 6 つの点を直線で結んだ、余誤差関数の近似式である。

$$x_n = \left\{ \frac{1}{L_n} \cdot \frac{t}{2\sqrt{\alpha}} \right\}^2 \text{ のとき、} \Delta T_{dw}(x,t) = R_n \cdot \Delta T_{f,e}(t) \quad (6. 1. 2)$$

よって、横軸に加熱面からの距離を、縦軸に温度上昇をとることで、図 6-1-1 の様に表わされる。

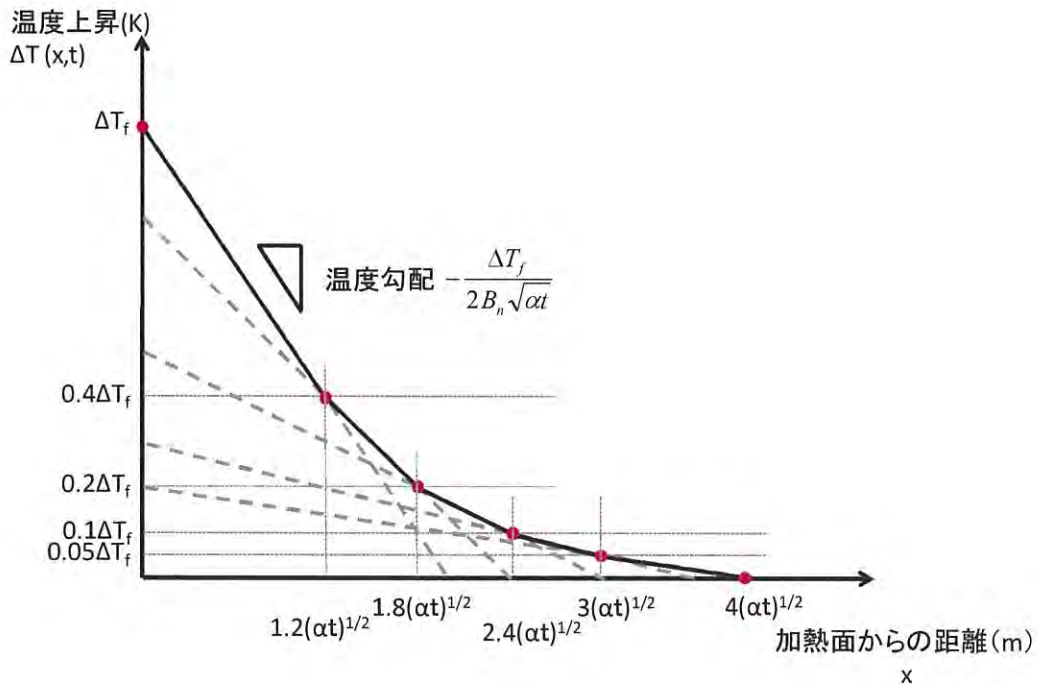


図 6-1-1 非定常温度分布(概念図)

ここで $\Delta T(x, t) = 0$ のとき

$$x = 4\sqrt{\alpha t} \quad (6.1.3)$$

これは、熱伝導の到達点の近似解を表わす。

そこで、図 6-1-1 を用いて、式 6.1.1 で表わされる乾燥壁の非定常温度分布が、時間の進行に伴ってどのように変化するかについて考えてみる。

まず加熱温度一定と考えると、表面温度は加熱温度で保持される。そして式 6.1.4 で示される熱伝導の到達点は、時間が進行するにつれて加熱面から遠ざかることが分かる。また、図 6-1-1 に赤点で示す他の点についても、時間の進行とともに加熱面から遠ざかることから、図 6-1-2 に示すように、時間が進行するにつれて、温度分布はより小さな弧を描くことが分かる。そして十分に時間が経過すると温度勾配一定の定常状態に至ることが予測される。

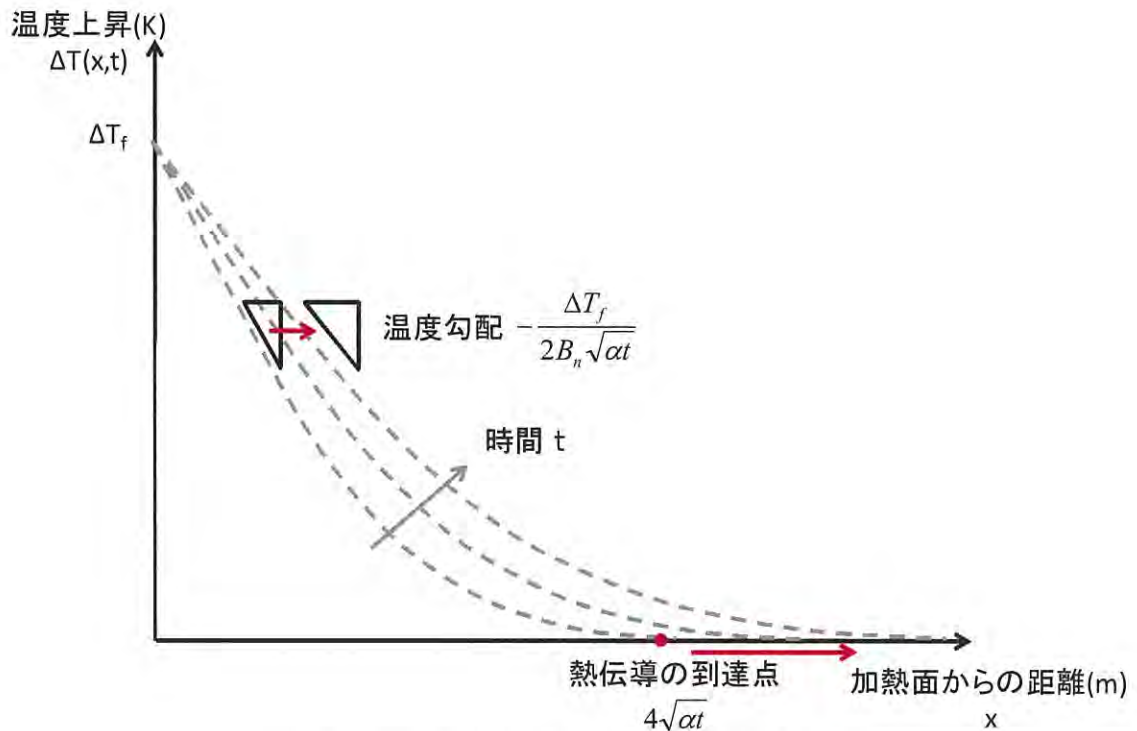


図 6-1-2 乾燥壁の非定常温度分布(概念図)

本章では、蒸発到達点での温度勾配から伝導熱流束を求めることを目的としているが、壁体内部の温度分布は時々刻々と変化することから、一見不可能なように思われる。

しかし、これらの各時刻の温度分布は、フーリエ数 $F_0 = x^2 / (\alpha t)$ を用いた $1/2F_0^{1/2}$ を横軸にとることによって、一本の特性曲線で表わすことができる。

(b) 図6-1-3に実線で示すように、壁体内の無次元温度上昇はフーリエ数の余誤差関数として、1つの曲線で表わされる。

ここで簡単のため、

$$\xi = \frac{1}{2} F_0^{\frac{1}{2}} = \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \text{ において、あるフーリエ数 } \xi \text{ における比例定数を考える。}$$

比例定数 D は、加熱表面での無次元温度と、フーリエ数 ξ での無次元温度を直線で結んだ温度勾配 θ_2 に対する、フーリエ数 ξ での接線で表わされる温度上昇過渡期の温度勾配 θ_1 の比であることから、比例定数をフーリエ数の関数として以下のように示すことができる。

$$D = \frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{\frac{erfc'(\xi)}{\left(\frac{1-erfc(\xi)}{\xi}\right)}}{\frac{\frac{2}{\pi} \exp(-\xi^2)}{\left(\frac{erf(\xi)}{\xi}\right)}} = \frac{2\xi \cdot \exp(-\xi^2)}{\pi \cdot erf(\xi)} \quad (6.1.4)$$

ここに

D : 比例定数

θ_1 : $\xi = \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$ における接線で表わされる温度上昇過渡期の温度勾配

θ_2 : 加熱表面での無次元温度と $\xi = \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$ における無次元温度を直線で結んだ温度勾配

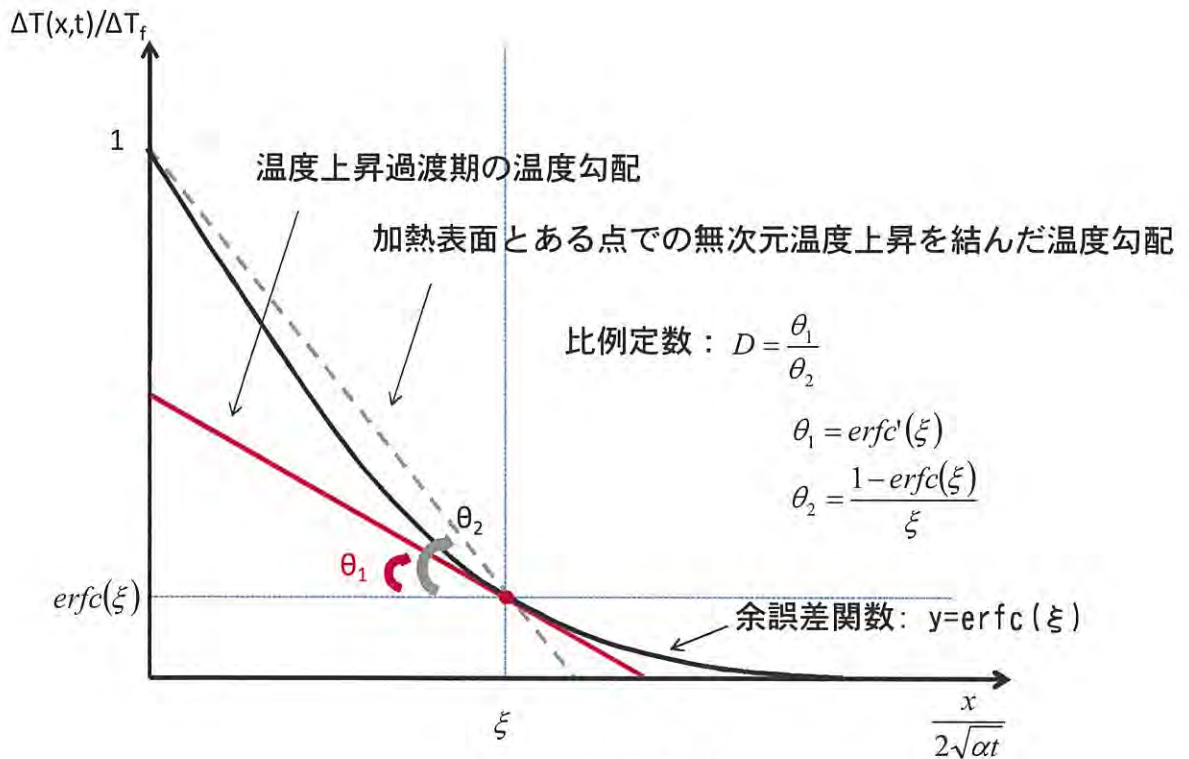


図6-1-3 比例定数 D

6.2 蒸発到達点の簡易予測式

比例定数をフーリエ数の関数で示すことができたため、次は、蒸発が起きている時間と位置を示すフーリエ数（蒸発到達点と ϕ とする）の算出方法について考える。

6.2.1 数値解析による検討

まず、数値計算により含湿壁の非定常温度分布を求め、蒸発到達点の算出方法について検討を行う。

6.2.1.1 計算条件

表 6-2-1 に示す壁の物性値を用いて、表面温度を 780°C で一定とした場合について、含水率 $\phi=0\sim 16\%$ で段階的に変化させたときの非定常温度分布を求める。初期温度を 20°C 、蒸発温度を 100°C として非加熱側の境界条件は半無限固体近似とした。解析時間刻みを 1 秒として節点距離は 1mm で行った。

表 6-2-1 土壁の物性値

	乾燥密度 [kg/m ³]	比熱 [kJ/kg K]	熱伝導率 $\times 10^{-3}$ [kW/m K]
土壁	1360	0.88	0.4

6.2.1.2 計算結果

縦軸に無次元温度、横軸にフーリエ数 $1/2F_0^{1/2}$ を用いて、数値解を無次元化して示す。まず図 6-2-1 に $\phi=16\%$ のときを例に示す。

- ・水分蒸発はある時間にはある 1 点（蒸発到達点）でのみ起こるとみなす水分蒸発モデルを用いて、非定常温度分布を無次元数で整理した結果、同一含水率においては位置 x と時間 t を様々に変化させてもほとんどばらつきがみられず、一本の特性曲線に収束した。
- ・このとき、非定常温度分布は無次元温度 $\Delta T(x, t) / \Delta T_f = \Delta T_v / \Delta T_f$ となる蒸発到達点で、く
の字に折れ曲がることが分かった。
- ・乾燥壁に比べて、同じ位置の同じ時間すなわち同じフーリエ数における含湿壁の温度上昇は、水分蒸発の影響により抑制され、その温度上昇差は蒸発到達点で最大値をとることが分かった。

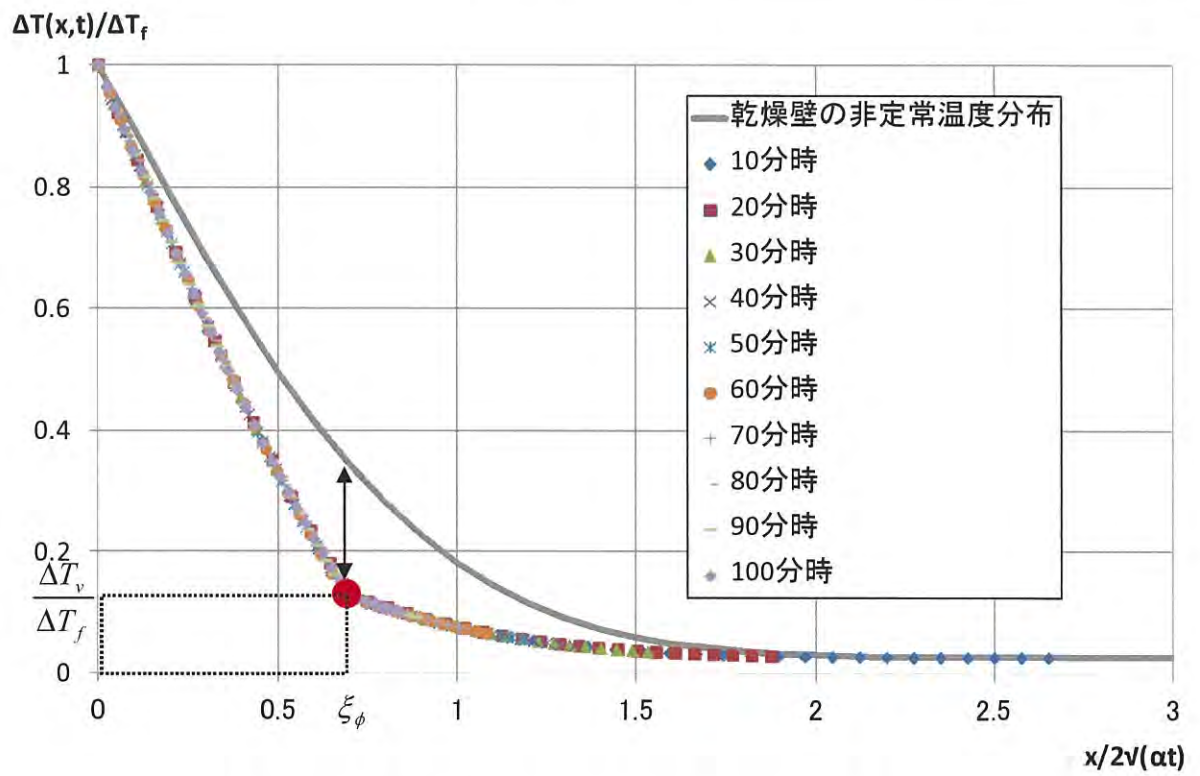


図 6-2-1 含湿壁の非定常温度分布($\phi=0.16$ の数値解)

半無限固体近似をすれば含湿壁の非定常温度分布も1本の特性曲線で示されることが分かったため、30分時における温度分布を代表値として、含水率に対する非定常温度分布の変化を図6-2-2に示す。

- ・無次元温度が $\Delta T_v / \Delta T_f$ となる蒸発到達点は、あるフーリエ数で表わされ、これを ξ_ϕ とみると、含水率 ϕ が大きくなるにつれて、水分の蒸発に奪われる熱量が大きくなるため、蒸発到達点 ξ_ϕ における乾燥壁と含湿壁の温度上昇差が増大していくことが分かる。
- ・横軸についていえば、含水率が大きくなるにつれて、蒸発到達点 ξ_ϕ は小さい値をとることが分かる。
- ・また加熱面と蒸発到達点を結んだ温度勾配は、含水率が小さい時は余誤差関数に近い弧を描き、含水率が大きくなるに従って蒸発到達点 ξ_ϕ が小さい値をとるため、直線に近づくことがわかる。

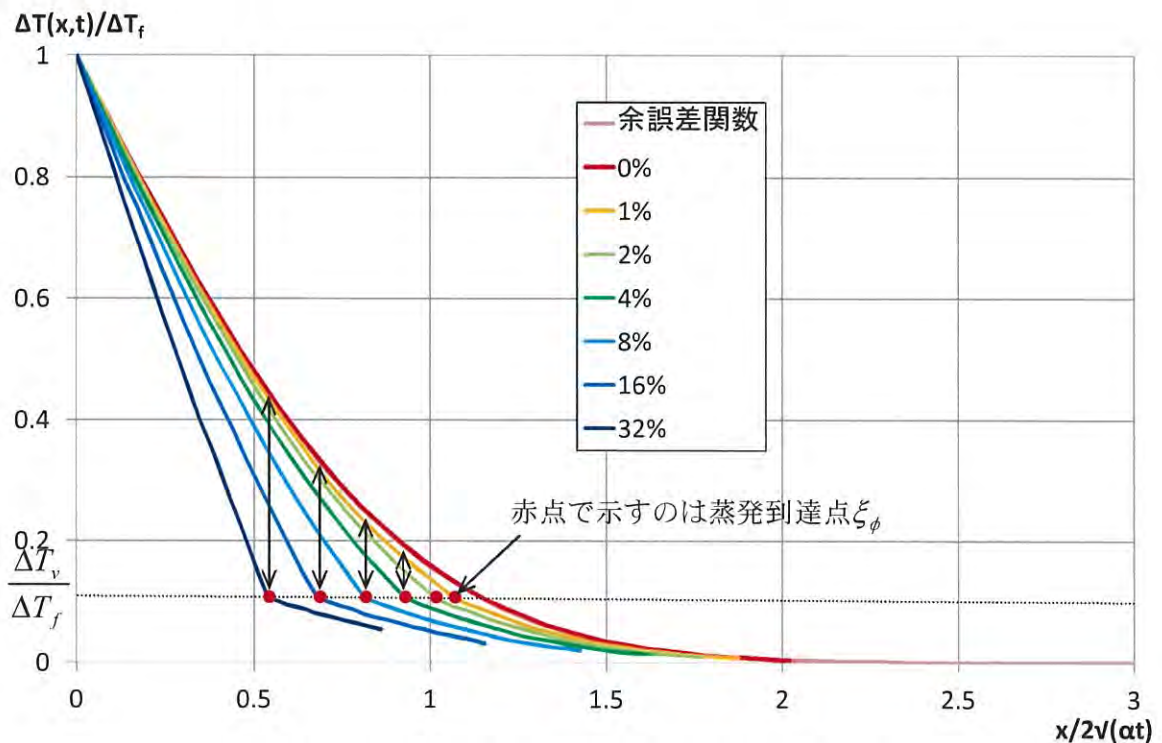


図 6-2-2 含湿壁の非定常温度分布比較(数値解)

6.2.2 蒸発到達点の簡易予測モデル

含湿壁の非定常温度分布は、含水率に応じて1本の特性曲線で示されることが分かった。この字に折れ曲がっている点、すなわち温度上昇が $\Delta T_v / \Delta T_f$ となる点が蒸発到達点 ξ_ϕ であり、水分が蒸発している時間と位置を示している。(図 6-2-3)。

(a) 図 6-2-3 で時間 t を固定して、壁体内の温度分布として捉え、蒸発到達点における伝導熱流束を水分量の関数として表わす。

蒸発到達点 ξ_ϕ における入射熱量が、初期温度から水分の蒸発温度までの温度上昇と、水分蒸発に消費されるとすると、次の熱収支式が成り立つ。なお水蒸気は周囲の温度上昇に影響を与えず、拡散するものとする。

蒸発到達点での熱量収支式

$$\dot{q}'' \cdot dA \cdot dt = L_w \phi \rho \cdot dA \cdot dx + C_w \rho \cdot dA \cdot dx \cdot (T_v - T_0) \quad (6.2.1)$$

ここに

\dot{q}'' : 単位時間当たりの蒸発到達点への伝導熱流束 ($kW / m^2 s$)

ϕ : 部材乾燥質量に対する含水率 (kg / kg)

L_w : 蒸発潜熱 (kJ / kg)

ρ : 材料の密度 (kg / m^3)

C_w : 材料の比熱 (kJ / kgK)

T_v : 蒸発温度 (K)

T_0 : 初期温度 (K)

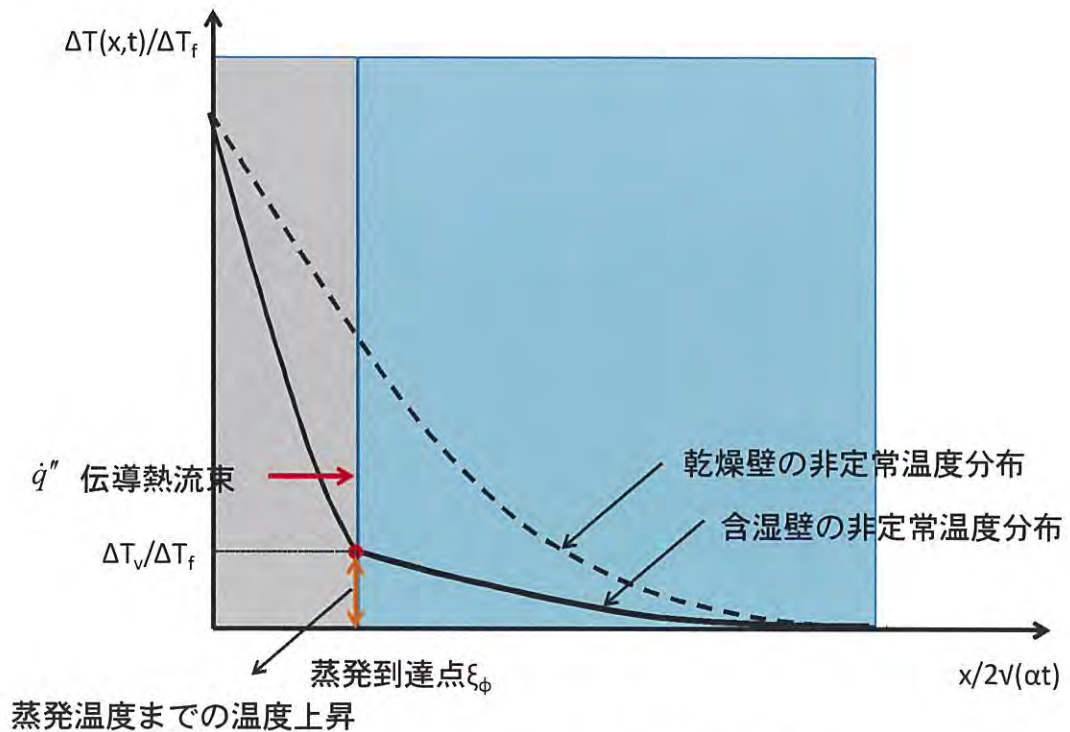


図 6-2-3 蒸発到達点における熱収支(概念図)

(b) また蒸発到達点 ξ_ϕ への伝導熱流束は、比例定数 D を用いてフーリエ数（蒸発到達点 ξ_ϕ ）の関数として表わされる（式 6.2.2）。

$$\begin{aligned}\dot{q}'' &= D \times \lambda \frac{T_f - T_v}{x} \\ &= \frac{2\xi_\phi \cdot \exp(-\xi_\phi^2)}{\pi \cdot \operatorname{erf}(\xi_\phi)} \cdot \frac{\lambda(T_f - T_v)}{x}\end{aligned}\quad (6.2.2)$$

ここに

λ : 熱伝導率 (kW / mK)

(d) そこで式 6.2.1 と式 6.2.2 を用いて、蒸発到達点を水分量の関数として表わすことを考える。
式 6.2.1 に式 6.2.2 を代入し、

$$D \times \lambda \frac{T_f - T_v}{x} \cdot dA \cdot dt = L_w \phi \rho \cdot dA \cdot dx + C_w \rho \cdot dA \cdot dx \cdot (T_v - T_0) \quad (6.2.3)$$

両辺を整理して、 $\lambda = \alpha \rho C_w$ を代入すると

$$dt = \frac{1}{D} \frac{L_w \phi + C_w (T_v - T_0)}{C_w (T_f - T_v)} \frac{1}{\alpha} \cdot x dx \quad (6.2.4)$$

両辺を積分すると

$$t = \frac{1}{D} \frac{L_w \phi + C_w (T_v - T_0)}{C_w (T_f - T_v)} \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{1}{2} x^2 \quad (6.2.5)$$

$x/2 (\alpha t)^{1/2}$ で整理して

$$\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} = \left(\frac{1}{D} \cdot \frac{1}{2} \frac{C_w (T_f - T_v)}{L_w \phi + C_w (T_v - T_0)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.2.6)$$

式 6.2.6 の左辺は蒸発が起きている時間と位置すなわち蒸発到達点である。

$$\xi_\phi = \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \quad (6.2.7)$$

また

$$D = \frac{2\xi_\phi \cdot \exp(-\xi_\phi^2)}{\pi \cdot \operatorname{erf}(\xi_\phi)} \quad (6.2.8)$$

であるため、式 6.2.7、6.2.8 を式 6.2.6 に代入して

$$\xi_\phi = \left(\frac{2\xi_\phi \cdot \exp(-\xi_\phi^2)}{\pi \cdot \operatorname{erf}(\xi_\phi)} \cdot \frac{1}{2} \frac{C_w (T_f - T_v)}{L_w \phi + C_w (T_v - T_0)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.2.9)$$

両辺を二乗すると

$$\xi_{\phi}^2 = \frac{2\xi_{\phi} \cdot \exp(-\xi_{\phi}^2)}{\pi \cdot \operatorname{erf}(\xi_{\phi})} \cdot \frac{1}{2} \frac{C_w(T_f - T_v)}{L_w\phi + C_w(T_v - T_0)} \quad (6.2.10)$$

蒸発到達点 ξ_{ϕ} について解くと以下ようになる。

$$\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\xi_{\phi} \cdot \operatorname{erf}(\xi_{\phi})}{\exp(-\xi_{\phi}^2)} = \frac{1}{2} \frac{C_w(T_f - T_v)}{L_w\phi + C_w(T_v - T_0)} \quad (6.2.11)$$

(d) 式 6.2.11 は少し複雑なようにも見えるが、右辺は定数であり、それに応じた蒸発到達点 ξ_{ϕ} が一意に求められることになる。左辺はどれも Excel などの計算ソフトに標準的に組み込まれている関数であるが、手計算のために表 6-2-2 に換算表を示す。

表 6-2-2 蒸発到達点 ξ_{ϕ} と $\pi \xi_{\phi} \cdot \operatorname{erf}(\xi_{\phi}) / 2 \exp(-\xi_{\phi}^2)$ の換算表

ξ_{ϕ}	$\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\xi_{\phi} \cdot \operatorname{erf}(\xi_{\phi})}{\exp(-\xi_{\phi}^2)}$
0	0
0.10	0.01
0.14	0.02
0.17	0.03
0.20	0.04
0.22	0.05
0.24	0.06
0.26	0.07
0.28	0.08
0.29	0.09
0.31	0.10
0.33	0.12
0.36	0.14
0.38	0.16
0.40	0.18
0.42	0.20
0.46	0.24
0.49	0.28
0.52	0.32
0.54	0.36
0.57	0.40
0.62	0.50
0.67	0.60
0.71	0.70
0.74	0.80
0.77	0.90
0.80	1.0
0.85	1.2
0.90	1.4

ξ_{ϕ}	$\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\xi_{\phi} \cdot \operatorname{erf}(\xi_{\phi})}{\exp(-\xi_{\phi}^2)}$
0.93	1.6
0.97	1.8
1.00	2.0
1.06	2.5
1.11	3.0
1.16	3.5
1.19	4.0
1.23	4.5
1.26	5.0
1.31	6.0
1.35	7.0
1.39	8.0
1.42	9.0
1.45	10
1.50	12
1.54	14
1.57	16
1.60	18
1.63	20
1.68	25
1.73	30
1.77	35
1.80	40
1.85	50
1.89	60
1.93	70
1.96	80
1.98	90
2.01	100

また、蒸発到達点が実際にとる範囲は、

$$\operatorname{erfc}(\xi_{\phi, \max}) = \frac{\Delta T_v}{\Delta T_f} \text{ となるフーリエ数 } \xi_{\phi, \max} \text{ よりも小さくなるはずであるから、}$$

実火災における最高加熱温度を 1000°C 、蒸発温度を 100°C 、初期温度を 20°C とすると、誤差関数表より、

$$\xi_{\phi, \max} \approx 1.23 \text{ と考えることができる。}$$

また、含水率が大きいほど蒸発到達点は小さい値をとるが、建材に含まれる水分量にも限りがあるため、仮に

$$\xi_{\phi, \min} = 0.4 \text{ として、}$$

$0.4 \leq \xi_{\phi} \leq 1.23$ の範囲内で、蒸発到達点 ξ_{ϕ} を初等関数で求める近似式を以下に示す。図 6-2-4 に Excel を用いて式 6.2.11 から求めた蒸発到達点の推移を示す。

式 6.2.11 で右辺を E とおいて、

$$E = \frac{1}{2} \frac{C_p(T_f - T_v)}{L_w \phi + C_p(T_v - T_0)} \quad (6.2.12)$$

図 6-2-4 から近似曲線を求める。

$$\begin{aligned} \xi_{\phi} &= 0.26 \log_e E + 0.81 \\ &= 0.26 \log_e \left\{ \frac{1}{2} \frac{C_p(T_f - T_v)}{L_w \phi + C_p(T_v - T_0)} \right\} + 0.81 \quad \{0.4 \leq \xi_{\phi} \leq 1.23\} \end{aligned} \quad (6.2.13)$$

この範囲を外れる場合は、表 6-2-2 を用いて蒸発到達点を求めればよい。
蒸発到達点を含水率の関数として表わすことができた。

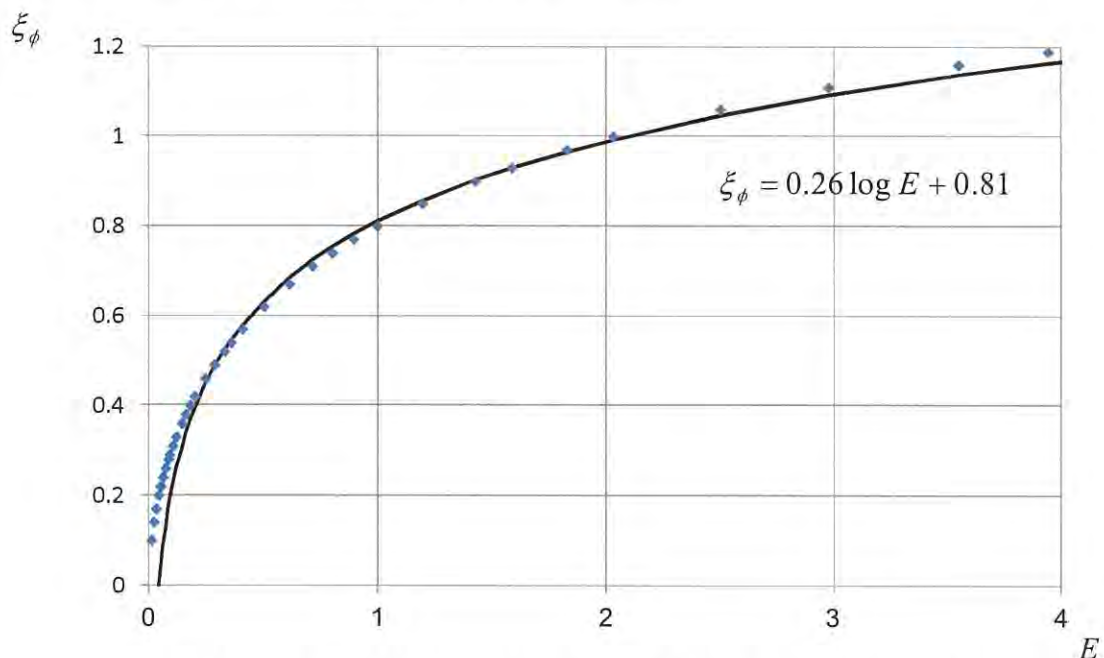


図 6-2-4 蒸発到達点 ξ_{ϕ} と $\pi \xi_{\phi} \cdot \operatorname{erf}(\xi_{\phi}) / 2 \exp(-\xi_{\phi}^2)$ の関係

6.2.3 蒸発到達点の妥当性の検証

前節でもとめた蒸発到達点を用いて簡易予測式で計算される蒸発完了時間を、数値解と比較して、妥当性を検証する。

6.2.3.1 計算条件

(i) 共通条件

表 6-2-1 に示す壁の物性値を用いて、蒸発温度を 100℃、初期温度を 20℃とする。加熱温度を 780℃で一定とした場合について、含水率 $\phi = 0, 2, 4, 8, 16, 32\%$ で段階的に変化させたときの蒸発完了時間を求める。

(a) 簡易予測式の計算条件

加熱温度＝表面温度と近似して、780℃で一定とする。各含水率に対する蒸発到達点は式 6.2.13 を用いて求められ、蒸発完了時間は次式のように蒸発到達点を用いて簡易に求めることができる。

$$t_{\xi\phi} = \left(\frac{1}{\xi_{\phi}} \cdot \frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \quad (6.2.20)$$

(b) 数値解析の計算条件

加熱温度を 780℃で一定として、加熱側表面の環境条件は表 6-2-3 を用いて、非加熱側の境界条件は半無限固体近似とし、時間刻みを 1 秒、節点距離は 1mm として計算した。

表 6-2-3 環境条件

	熱伝達率[kW/m ² K]	輻射伝達率
加熱側	0.03	0.8
外気側	0.01	0.8

6.2.3.2 計算結果

式 6.2.21 に含水率を 1%としたときの計算例を示し、表 6-2-4 に、簡易予測式を用いて求めた、各含水率の蒸発到達点 ξ_{ϕ} の値を示す。

$$\xi_{\phi} = 0.26 \log_e \left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{1 - \frac{80}{760}}{\frac{2450 \cdot 0.01}{0.88 \cdot 760} + \frac{80}{760}} \right\} + 0.81 = 1.11 \quad (6.2.21)$$

表 6-2-4 各含水率における蒸発到達点の簡易予測値

含水率 ϕ	蒸発到達点 ξ
0.01	1.11
0.02	1.05
0.04	0.96
0.08	0.84
0.16	0.70
0.32	0.52

図 6-2-5 に蒸発完了時間の簡易予測式と数値解の比較を示す。

・簡易式では加熱温度を表面温度と近似しているため、蒸発完了時間を多少短く見積もる傾向にあるが、両者は、含水率および加熱面からの距離を変化させても非常によく一致することが分かり、簡易予測式の妥当性を示すことができた。

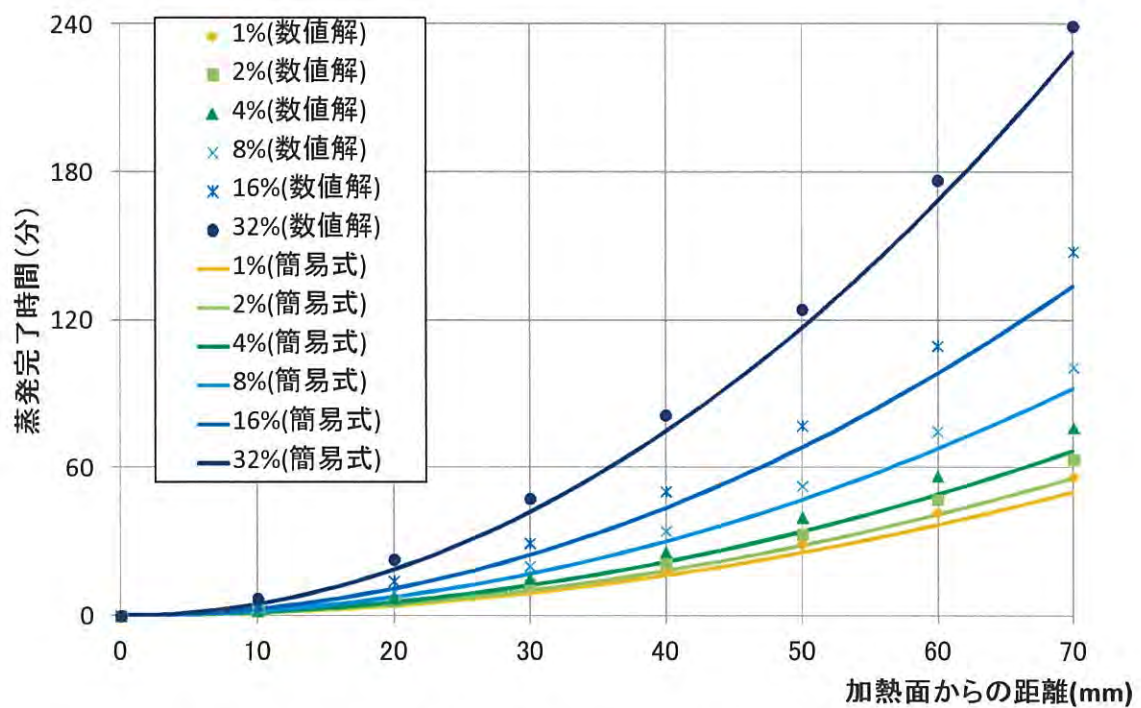


図 6-2-5 蒸発完了時間と含水率および加熱面からの距離の関係(簡易式と数値解の比較)

これに対し前章までは、含湿壁の蒸発完了時間と乾燥壁の蒸発完了時間の差を、蒸発時間として扱ってきた。そこで図 6-2-5 に示す各含水率の蒸発完了時間から、乾燥壁の蒸発完了時間を差し引いて求めた蒸発時間を図 6-2-6 に示す。

・両者は、含水率および加熱面からの距離を変化させても非常によく一致することが分かり、簡易予測式の妥当性を示すことができた。これにより、より精度高く蒸発時間を求めることが可能になった。

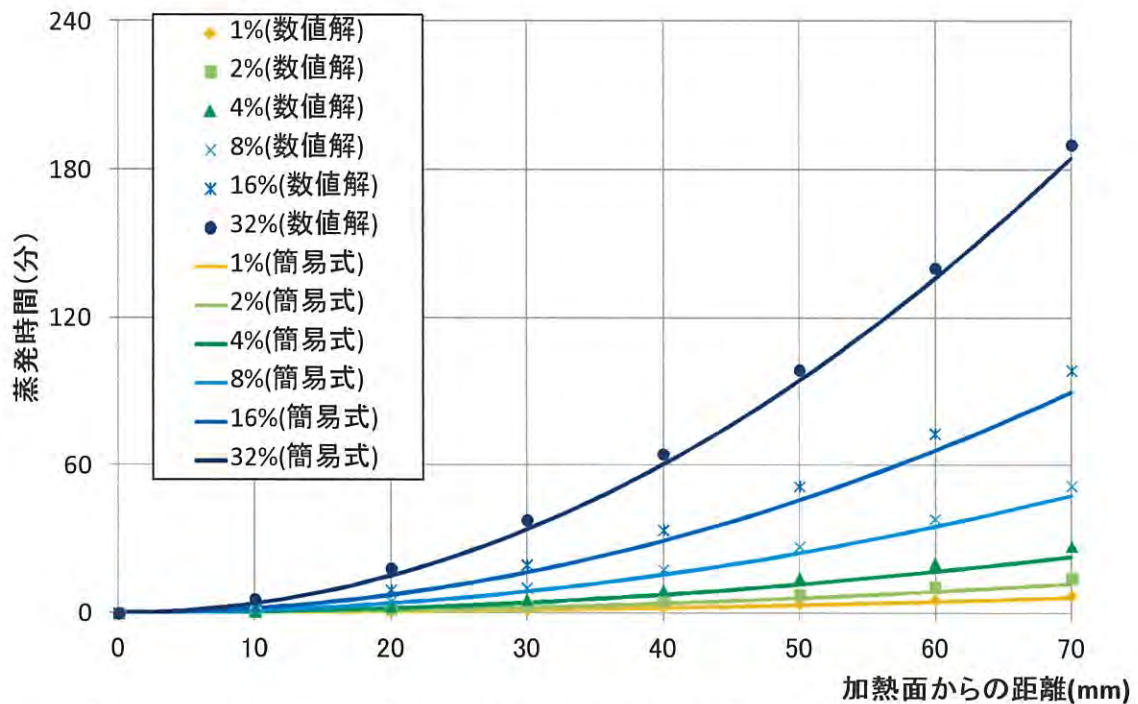


図 6-2-6 蒸発時間と含水率および加熱面からの距離の関係(簡易式と数値解の比較)

6.3 含湿壁の非定常温度分布の簡易予測式

前節で求めた蒸発到達点を用いて、フーリエ軸上において含湿壁の非定常温度分布を予測する手法について考える。

第3章では含湿壁の温度上昇時間は、乾燥壁と含湿壁が蒸発温度に達するまでの温度上昇時間の差を蒸発時間として、時間軸で足し合わせることで、含湿壁の温度上昇を予測してきた。

この場合、蒸発完了後の温度上昇速度は乾燥壁と含湿壁で変化しないことになる。しかし数値解より求めた非定常温度分布では、蒸発到達点での熱抵抗により、蒸発到達点より加熱側では内部温度分布が変化するため、温度上昇速度が乾燥壁に比べて速くなることがわかった。

そこで本章では、乾燥壁の非定常温度分布と含湿壁の非定常温度分布の差が、水分蒸発の影響を示すと考え、乾燥壁の温度上昇からこの温度分布差を差し引くことで、含湿壁の温度上昇を求める簡易予測式を提案する。

(a) まず、 $\Delta T(x, t) > \Delta T_v$ (蒸発完了後) の含湿壁の非定常温度分布について考える。

今、図 6-4-1 に示すように、乾燥壁の非定常温度分布と含湿壁の非定常温度分布で囲まれる部分の面積が、 $(0, \Delta T_v/\Delta T_f)$ と $(\xi_\phi, \text{erfc}(\xi_\phi))$ および $(\xi_\phi, \Delta T_v/\Delta T_f)$ の3点を結んだ三角形の面積と等しいと近似すると、乾燥壁と含湿壁の非定常温度分布の差は、0 と $\text{erfc}(\xi_\phi)$ を結ぶ直線すなわち式 6.3.1 で示される。

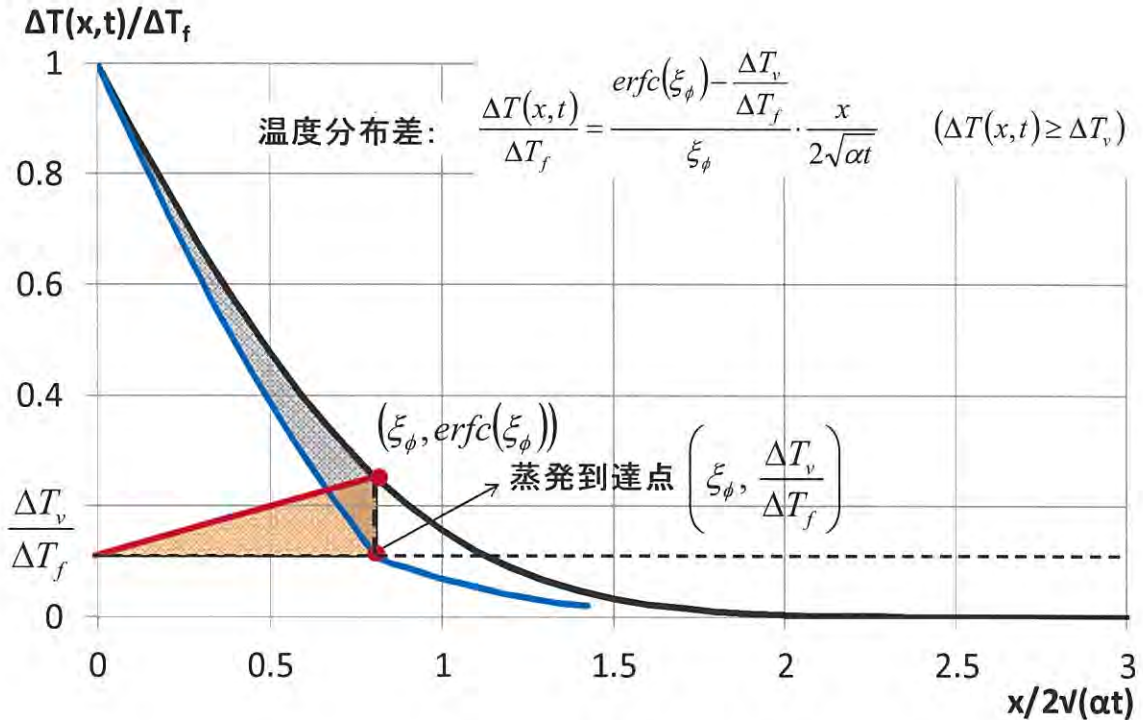


図 6-3-1 乾燥壁と含湿壁の非定常温度分布差の図形近似(概念図)

温度分布差：

$$\frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} = \frac{\text{erfc}(\xi_\phi) - \frac{\Delta T_v}{\Delta T_f}}{\xi_\phi} \cdot \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \quad (\Delta T(x, t) \geq \Delta T_v) \quad (6.3.1)$$

余誤差関数を用いない簡易式で表わすと

$$\frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} = \frac{1}{\xi_\phi} \left(\frac{1}{B'_n} (A'_n - \xi_\phi) - \frac{\Delta T_v}{\Delta T_f} \right) \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \quad (6.3.2)$$

縦軸に無次元温度、横軸にフーリエ数 F_0 を用いた $1/F_0^{1/2}$ をとることで、水分蒸発の影響を無次元温度上昇の差として捉え、 $1/2F_0^{1/2}$ に比例する直線で表わすことができた。

そこで乾燥壁の非定常温度分布から、式 6.3.1 で表わされる温度分布差を差し引いて、含湿壁の非定常温度分布の簡易予測式を求めると以下のように表わされる。

含湿壁の非定常温度分布 $\Delta T(x, t) > \Delta T_v$:

$$\frac{\Delta T_{wet}(x, t)}{\Delta T_f} = \frac{\Delta T_{dw}(x, t)}{\Delta T_f} - \frac{\operatorname{erfc}(\xi_\phi) - \frac{\Delta T_v}{\Delta T_f}}{\xi_\phi} \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \quad (6.3.3)$$

簡易式で表わすと

$$\frac{\Delta T_{wet}(x, t)}{\Delta T_f} = \frac{1}{B_n} \left(A_n - \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) - \frac{1}{\xi_\phi} \left(\frac{1}{B'_n} (A'_n - \xi_\phi) - \frac{\Delta T_v}{\Delta T_f} \right) \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \quad (6.3.4)$$

ここに

A'_n, B'_n は $R_{n-1} < \frac{\Delta T_v}{\Delta T_f} \leq R_n$ の適用範囲に応じて変化する係数

A_n, B_n は $L_{n-1} < \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \leq L_n$ の適用範囲に応じて変化する係数

表 6-1-1 簡易予測式の係数対応表

n	A_n	B_n	適用範囲			適用範囲		
			L_{n-1}	$1/2F_0^{1/2}$	L_n	R_{n-1}	無次元温度	R_n
1	2	10	2.0	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \geq$	1.5	0	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \leq$	0.05
2	1.8	6	1.5	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \geq$	1.2	0.05	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \leq$	0.1
3	1.5	3	1.2	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \geq$	0.9	0.1	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \leq$	0.2
4	1.2	1.5	0.9	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \geq$	0.6	0.2	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \leq$	0.4
5	1	1	0.6	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \geq$	0	0.4	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \leq$	1.0

水分蒸発の影響として現れる温度分布差を、図形近似することにより、フーリエ数の関数で表わすことができた。

これによると、水分蒸発の影響は蒸発到達点で最大値をとり、その後時間が進むにつれて、あるいは加熱面からの距離が小さくなるにつれて、小さくなっていくことがわかる。

そして乾燥壁の非定常温度分布から、水分蒸発による温度分布差を差し引いて、含湿壁の非定常温度分布を求める簡易予測式を提案した。

(b) 次に、 $\Delta T(x, t) < \Delta T_v$ (蒸発完了前) の含湿壁の非定常温度分布について考える。

この領域では横軸方向すなわちフーリエ数の差で考える。今、図 6-4-1 に示すように、乾燥壁の非定常温度分布と含湿壁の非定常温度分布で囲まれる部分の面積が、 $(\xi_\phi, 0)$ と $(\xi_\phi, \Delta T_v / \Delta T_f)$ および $(\xi_{dw}, \Delta T_v / \Delta T_f)$ の 3 点を結んだ三角形の面積と等しいと近似すると、乾燥壁と含湿壁のフーリエ数の差は、 $(\xi_\phi, 0)$ を起点として、 ξ_ϕ と ξ_{dw} を結ぶ直線すなわち式 6.3.5 で示される。

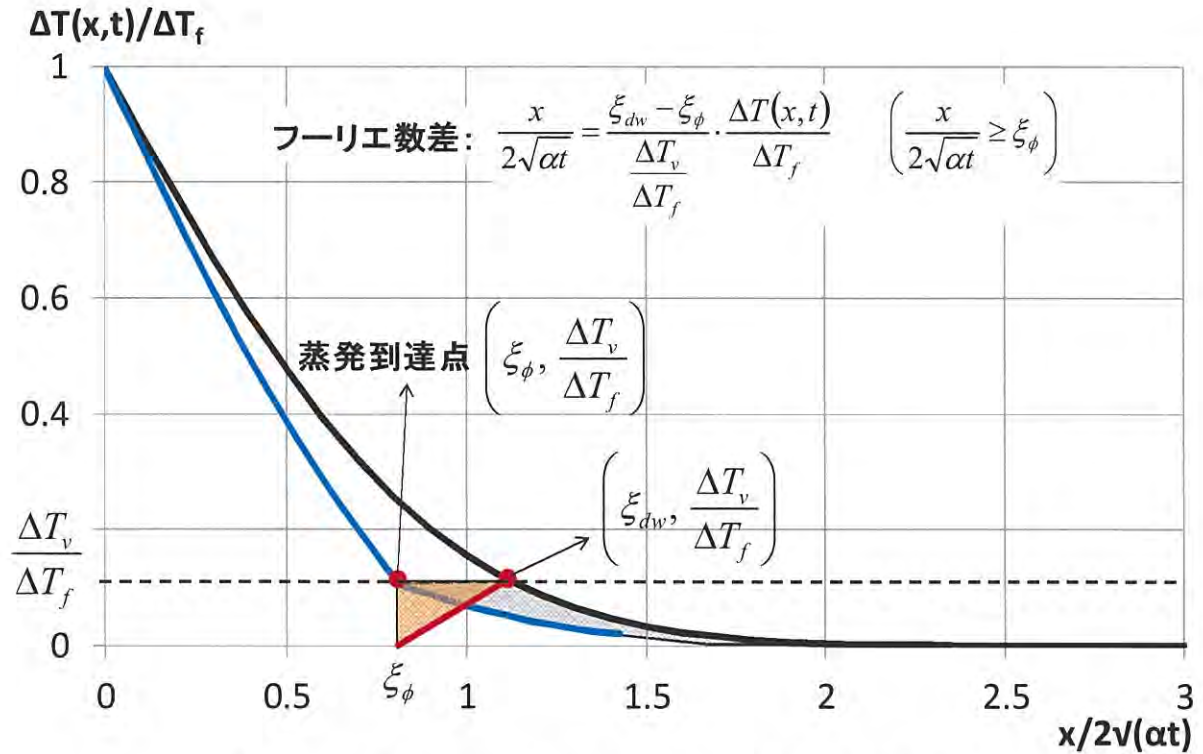


図 6-3-2 乾燥壁と含湿壁の非定常温度分布差の図形近似(概念図)

フーリエ数の差：

$$\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} = (\xi_{dw} - \xi_\phi) \cdot \frac{\frac{\Delta T_{wet}(x, t)}{\Delta T_f}}{\frac{\Delta T_v}{\Delta T_f}} \quad \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \geq \xi_\phi \right) \quad (6.3.5)$$

ここに

ξ_{dw} : 乾燥壁が $\frac{\Delta T_v}{\Delta T(x, t)}$ に達するときのフーリエ数

$$\frac{\frac{\Delta T_{wet}(x, t)}{\Delta T_f}}{\frac{\Delta T_v}{\Delta T_f}} \approx \frac{2 - \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}}{2 - \xi_\phi} \text{ と近似して、フーリエ数の差は以下のように表わせる。}$$

$$\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} = (\xi_{dw} - \xi_\phi) \cdot \frac{2 - \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}}{2 - \xi_\phi} \quad \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \geq \xi_\phi \right) \quad (6.3.6)$$

また、水分蒸発の影響をフーリエ数の差として捉え、含湿壁の非定常温度分布の簡易予測式を以下のように表わすことができる。

含湿壁の非定常温度分布 $\Delta T(x, t) < \Delta T_v$:

$$\frac{\Delta T_{wet}(x, t)}{\Delta T_f} = \operatorname{erfc} \left\{ \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + (\xi_{dw} - \xi_\phi) \frac{2 - \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}}{2 - \xi_\phi} \right\} \quad (6.3.7)$$

簡易式で表わすと

$$\frac{\Delta T_{wet}(x, t)}{\Delta T_f} = \frac{1}{B_n} \left[A_n - \left\{ \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + \left(A'_n - B'_n \frac{\Delta T_v}{\Delta T_f} - \xi_\phi \right) \frac{2 - \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}}{2 - \xi_\phi} \right\} \right] \quad (6.3.8)$$

ここに

A'_n, B'_n は $R_{n-1} < \frac{\Delta T_v}{\Delta T_f} \leq R_n$ の適用範囲に応じて変化する係数

A_n, B_n は $L_{n-1} < \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \leq L_n$ の適用範囲に応じて変化する係数

係数対応表は、表 6-1-1 参照。

水分蒸発の影響として現れるフーリエ数の差を、図形近似することにより、蒸発完了後の含湿壁の非定常温度分布を求める簡易予測式を提案した。

式 6.3.4、6.3.8 は、 x を固定すればある位置 x での温度履歴を、 t を固定すれば時間 t における温度分布を求めることができる。

6.3.1 含湿壁の非定常温度分布について妥当性の検証

含湿壁の非定常温度分布の簡易予測式と数値解との比較を行い、妥当性の検証を行う。

6.3.1.1 計算条件

(0) 共通条件

表 6-2-1 に示す壁の物性値を用いて、初期温度を 20℃、蒸発温度を 100℃、加熱温度を 780℃ で一定とした場合について、含水率 $\phi = 0 \sim 16\%$ で段階的に変化させたときの含湿壁の非定常温度分布を求める。

(a) 簡易予測式

加熱温度＝表面温度と近似して、780℃ で一定とする。含湿壁の非定常温度分布算出のフローチャートを図 6-3-3 に示す。

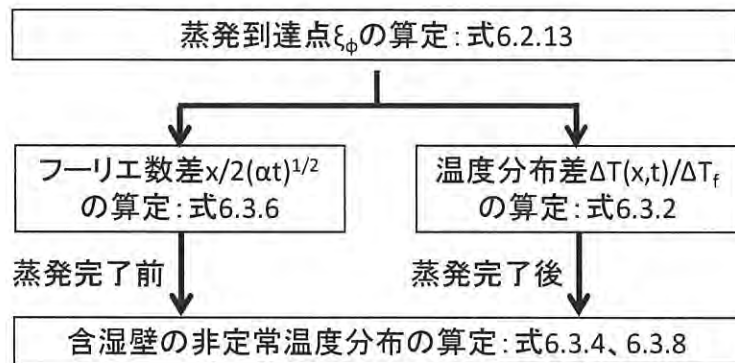


図 6-3-3 含湿壁の非定常温度分布算定のフローチャート

(b) 数値解析

加熱温度を 780℃ で一定として、加熱側表面の環境条件は表 6-2-4 を用いて、非加熱側の境界条件は半無限固体近似とした。解析時間刻みを 1 秒として節点距離は 1mm で行った。

6.3.1.2 計算結果

(a) 簡易予測式

まず式 6. 2. 12 を用いて、各含水率に対する E を求める。

$$E = \frac{1}{2} \cdot \frac{0.88(780 - 100)}{2450 \cdot \phi + 0.88(100 - 20)} = \frac{598}{4900\phi + 141} \quad (6. 2. 15)$$

次に式 6. 2. 13 を用いて、各含水率に対する蒸発到達点を求める。

$$\xi_{\phi} = 0.26 \log_e E + 0.81 \quad (6. 2. 13)$$

蒸発到達点 ξ_{ϕ} と見かけの熱拡散率 α' の簡易予測値を表 6-3-2 に示す。

表 6-3-1 各含水率における蒸発到達点の簡易予測値

含水率 ϕ	蒸発到達点 ξ_ϕ
0.01	1.11
0.02	1.05
0.04	0.96
0.08	0.84
0.16	0.70
0.32	0.52

そして含湿壁の非定常温度分布を以下の式より求める。

$\Delta T_{wet}(x, t) > \Delta T_v$ のとき

$$\begin{aligned} \frac{\Delta T_{wet}(x, t)}{\Delta T_f} &= \frac{1}{B_n} \left(A_n - \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) - \frac{1}{\xi_\phi} \left(\frac{1}{3} (1.5 - \xi_\phi) - 0.105 \right) \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \\ &= \frac{1}{B_n} \left(A_n - \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) - \left(\frac{0.395}{\xi_\phi} - \frac{1}{3} \right) \end{aligned} \quad (6.3.4)$$

$\Delta T_{wet}(x, t) < \Delta T_v$ のとき

$$\xi_{dw} = 1.5 - 3 \frac{80}{760} = 1.18 \text{ より}$$

$$\frac{\Delta T_{wet}(x, t)}{\Delta T_f} = \frac{1}{B_n} \left[A_n - \left\{ \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + (1.18 - \xi_\phi) \frac{2 - \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}}{2 - \xi_\phi} \right\} \right] \quad (6.3.8)$$

A_n, B_n は $L_{n-1} < \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \leq L_n$ の適用範囲に応じて変化する係数 (表6-1-1参照)

(b) 簡易予測式と数値解の比較

図 6-3-3 に含湿壁の非定常温度分布の簡易予測式と数値解の比較を示す。数値解を記号で示し、簡易予測式を実線で示す。数値解は、30 分時における温度分布を代表値として示す。

・加熱温度を表面温度と近似しているため、蒸発完了後の非定常温度分布を、簡易式の方が多少高く見積もる傾向にあるが、両者は、含水率を変化させても非常によい一致がみられており、含湿壁の非定常温度分布の簡易予測式の妥当性が示せた。

これにより数値解析を行わなくても、含湿壁の非定常温度分布を精度よく求めることが可能になった。

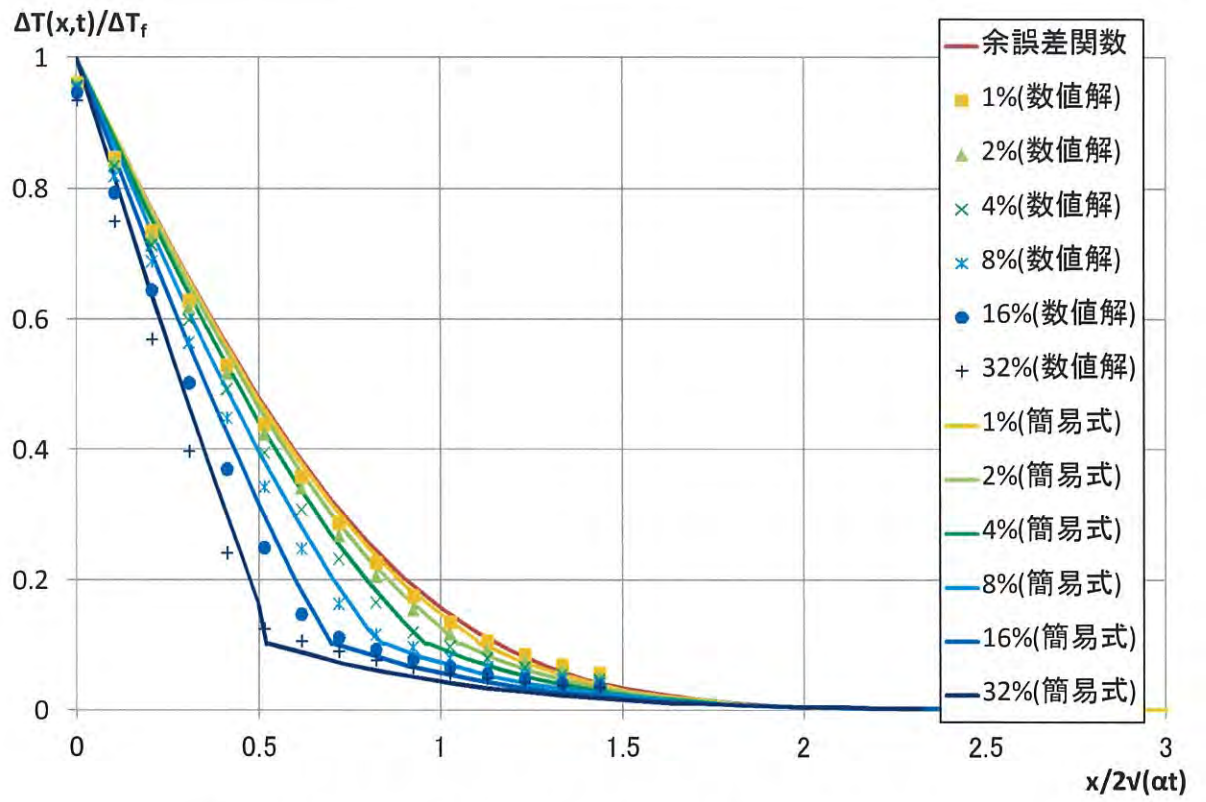


図 6-3-3 含湿壁の非定常温度分布(簡易式と数値解の比較)

6.4 まとめ

- ・数値解を用いた検討により、縦軸に無次元温度、横軸に時間軸の代わりに $1/2F_0^{1/2}$ を用いて無次元化することで、含湿壁の非定常温度分布は1本の特性曲線で示せることをつかんだ。
- ・水分蒸発がある時間ではある1点（蒸発到達点）でのみ起きていると仮定すると、比例定数 D は、蒸発到達点 ξ_ϕ における温度勾配 θ_1 と、定常状態の温度勾配 θ_2 との比で表わされることを示した。
- ・比例定数 D で表わされる伝導熱流束を、蒸発到達点 ξ_ϕ における熱収支式に代入して解くことで、蒸発到達点 ξ_ϕ を水分量の関数として求めた。
- ・蒸発到達点 ξ_ϕ を用いて、蒸発完了時間および蒸発時間について簡易に予測することができるようになった。
- ・蒸発到達点 ξ_ϕ を用いて、乾燥壁の非定常温度分布から水分蒸発の影響を差し引いた温度分布差を導き、蒸発完了後の含湿壁の非定常温度分布を求める簡易予測式を提案した。
- ・また、蒸発温度に達するときの、乾燥壁のフーリエ数と含湿壁のフーリエ数の差を、蒸発到達点を用いて求め、蒸発完了前の含湿壁の非定常温度分布を求める簡易予測式を提案した。
- ・これらの簡易予測式を数値解と比較して妥当性を示した。同じ式を用いて含湿壁の温度上昇の時間変化を予測することも可能である。ただし現状では加熱温度一定の条件下にのみ適用しており、実験値との比較を行っていないため、今後の検討課題とする。

これまで含湿壁の、ある位置 x における温度上昇の時間変化は、乾燥壁の温度上昇の時間変化に、蒸発に要する時間を時間軸に対して足し合わせることで表現してきた。本章ではそれを改め、乾燥壁の温度上昇の時間変化から、蒸発により抑制される温度上昇を差し引くことで、含湿壁の温度上昇の時間変化を求める式を示した。そして、蒸発完了後の温度分布の変化により、蒸発による温度上昇の抑制効果は時間が進むほど小さくなることを明らかにした。この影響は含水率の低い材料についてはほとんど影響がないが、石膏ボードの様に温度上昇の抑制に水分の蒸発が大きく寄与している材料については、無視できないものである。

第7章 研究成果・結論

本研究では、耐火試験に代表される区画火災に曝される含湿区画壁の温度上昇を簡易に予測することを目的とし、簡易予測式の提案を行った。簡易予測式を導くために、また簡易予測式の妥当性と適用範囲を明らかにするために、厚さと含水率を変えた土壁の加熱実験、加熱強度を変えた石膏ボードの加熱実験を行った。また簡易予測式に合わせて水分の移動を考慮しない単純な1次元熱伝導モデルを作成し、比較を行った。これらを用いて下記の成果を得ることができた。

7.1 加熱温度一定の条件下における土壁の温度簡易予測式に関して

土壁の加熱実験から、土壁の温度上昇時間(180K)は、総厚に関係なく、加熱面からの距離に応じて概ね一定の値をとることが分かった。また水分蒸発の影響とみられる温度停滞時間の前後において、土壁の温度上昇速度に大きな違いはみられなかった。またこの温度停滞域は徐々に非加熱側に移行していくことが分かった。

これらを踏まえて、解析上は、土壁に含まれる水分の影響を、蒸発が完了する点が徐々に非加熱側へと移行していく、移動境界モデルとして取り扱うこととした。このとき、蒸発温度に達する含湿壁と乾燥壁の時間差を蒸発時間と定義すると、水分蒸発後の温度上昇時間は以下のように表現できると考え、簡易予測式を提案した。

$$t_{wet} = t_{dw} + t_v \quad (3.1.1)$$

ここに

t_{wet} : 含湿壁の温度上昇時間

t_{dw} : 乾燥壁の温度上昇時間

t_v : 蒸発時間

まず、半無限固体の表面温度が瞬時に引き上げ保たれる場合に対する熱伝導理論解を線形近似することで、

乾燥壁の温度上昇時間を求める簡易予測式と

$$t_{dw} = \left(A_n - B_n \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \quad \left\{ R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \leq R_n \right\} \quad (7.1.1)$$

乾燥壁の温度上昇を求める簡易予測式を示した。

$$\frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} = \frac{1}{B_n} \left(A_n - \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \quad \left\{ L_{n-1} < \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \leq L_n \right\} \quad (7.1.2)$$

ここに

 α : 熱拡散率 (m^2/s) x : 加熱面からの距離 (m) $\Delta T(x, t)$: 求めたい温度上昇 (K) ΔT_f : 加熱温度 - 初期温度 (K) n : 近似番号 R_{n-1}, R_n : 近似番号 n を適用する無次元温度 の下限と上限 L_n, L_{n-1} : 近似番号 n を適用する無次元数 $1/2F_0^{1/2}$ の下限と上限 A_n, B_n は、 $R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t)} \leq R_n$ または $L_n \leq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} < L_{n-1}$ に応じて変化する係数 (表4-5-1参照)

表 7-1-1 簡易予測式の係数対応表

n	A_n	B_n	適用範囲			適用範囲		
			L_{n-1}	$1/2F_0^{1/2}$	L_n	R_{n-1}	無次元温度	R_n
1	2	10	2.0	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \geq$	1.5	0	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f(t)} \leq$	0.05
2	1.8	6	1.5	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \geq$	1.2	0.05	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f(t)} \leq$	0.1
3	1.5	3	1.2	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \geq$	0.9	0.1	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f(t)} \leq$	0.2
4	1.2	1.5	0.9	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \geq$	0.6	0.2	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f(t)} \leq$	0.4
5	1	1	0.6	$\geq \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \geq$	0	0.4	$\leq \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f(t)} \leq$	1.0

次に、水分蒸発がある時間にはある1点でのみ起きていると考え、蒸発時間の簡易予測式を導出した。

$$t_v = \frac{4.9 \times 10^3}{D} \left(\frac{\phi}{C_w (T_f - T_v)} \right) \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \quad (7.1.3)$$

ここに

α : 熱拡散率 (m^2/s)

C_w : 比熱 (kJ/kgK)

ϕ : 部材乾燥質量に対する含水率 (kg/kg)

T_f : 加熱表面温度 (K)

T_v : 水分の蒸発温度 (K)

D : 比例定数

そしてこれらを足し合わせることで、含湿壁の温度上昇時間 t_{wet} を求める簡易予測式を提案した。

$$t_{wet} = \left(A_n - B_n \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 + \frac{4.9 \times 10^3}{D} \left\{ \frac{\phi}{C_w (T_f - T_v)} \right\} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \quad R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_f} \leq R_n \quad (7.1.4)$$

数値解との比較からこれらの簡易予測式の妥当性を検証し、

(a) 表面温度を加熱温度で近似できる適用範囲について、評価対象とする時間 t_r に対する t' (表面温度の無次元温度が 0.9 に達する時間) の比が 1/10 以下になることを適用条件として、以下のように示した。

$$t_r \geq \frac{0.49 \times 10^{20} \cdot \lambda \rho C_w}{T_f^6} \quad (7.1.5)$$

(b) 半無限固体として近似できる適用範囲について、非加熱側表面を外気に開放した場合については、非加熱側表面での無次元温度上昇が 0.1 に達するまで、非加熱側表面を断熱パッドで覆った場合には、非加熱側表面での無次元温度上昇が 0.2 に達するまでとした。

7.2 標準加熱曲線下における土壁の温度簡易予測式に関して

時間 t の関数で表わされる標準加熱曲線 $T_f(t)$ から、要求耐火時間 t までの標準加熱曲線下の面積に等しい等価加熱温度 $T_{f,e}(t)$ を算出して等価加熱温度とした。

$$T_{f,e}(t) - T_0 = \frac{6}{7} \beta t^{1/6} = \frac{6}{7} (T_f(t) - T_0) \quad (7.2.1)$$

β : 火災成長率
 t : 時間(s)

前章で提案した一定加熱の条件下における温度上昇時間を求める簡易予測式を用いて、標準加熱曲線下における温度上昇時間を求めるため、乾燥壁の温度上昇時間と蒸発時間に分けて、等価加熱温度を導入した簡易予測式の提案を行った。

$$t_{dw} = \left(A_n - B_n \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t_{dw})} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \quad R_{n-1} < \frac{\Delta T(x, t)}{\Delta T_{f,e}(t_{dw})} \leq R_n \quad (7.2.2)$$

$$t_v = \left\{ \frac{4.9 \times 10^3}{D} \frac{7}{6} \frac{\phi}{C_w \beta} \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \right\}^{6/7} \quad (7.2.3)$$

$T_{f,e}(t)$: 等価加熱温度(℃)

これより、耐火試験の実験値との比較が可能となった。土壁の実験との比較から、以下の知見を得た。

- ・ある点での温度上昇が 100℃ 以上の領域では、簡易予測式と実験値はよい一致を見せることが分かった。
- ・100℃ 以下の領域については、水分蒸発がある時間にはある 1 点でのみ起きているとする水分蒸発モデルに対し、実験では温度停滞が観測されることから、温度履歴に違いが生じることが分かった。

また、水分蒸発前の時間帯を乾燥壁として考え、乾燥壁の温度上昇時間の簡易予測式に、土壁の加熱実験の温度測定データを代入して、熱拡散率 α を推定した。

7.3 異なる加熱曲線下における石膏ボードの温度簡易予測式に関して

石膏ボードの加熱実験を行い、土壁の際には 100℃ 付近にしか見られなかった温度停滞域が、100℃ 付近と 125℃ 付近で 2 度見られること、加熱強度を上げることで、温度停滞の時間が短くなるほか、温度上昇速度が速くなることを明らかにした。

石膏ボードの温度履歴を求めるために、結晶水を等価含水率で表わすように改良を行った。また水分の反応温度を複数もつ材料に対して、蒸発時間の計算方法を改良した。そして石膏ボード単層壁の実験値および数値解析との比較から、以下の知見を得た。

- ・加熱条件の違いによる温度停滞時間と温度上昇速度の変化について、簡易予測式でも示すことができた。
- ・温度上昇が 200℃ 以下の領域では、実験値との良い一致をみせ、簡易予測式が石膏ボードにも適用できることを示した。
- ・しかし、200℃ 以上では中空層による断熱の影響から実験結果と違いが生じることが分かった。

7.4 加熱温度一定の条件下における含湿壁の非定常温度分布に関して

水分移動を考慮しない場合の含湿壁の非定常温度分布は、1本の特性曲線で示せることから、水分蒸発がある時間ではある1点（蒸発到達点）でのみ起きていると仮定して、比例定数 D を、蒸発到達点 ξ_ϕ における温度勾配 θ_1 と、定常状態の温度勾配 θ_2 との比で表わした。

$$D = \frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{\text{erfc}'(\xi_\phi)}{\left(\frac{1 - \text{erfc}(\xi_\phi)}{\xi_\phi}\right)} = \frac{2\xi_\phi \cdot \exp(-\xi_\phi^2)}{\pi \cdot \text{erf}(\xi_\phi)} \quad (7.4.1)$$

次に蒸発到達点 ξ_ϕ における熱収支式に、比例定数 D を代入して解くことで蒸発到達点 ξ_ϕ を求める簡易予測式を示した。

$$\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\xi_\phi \cdot \text{erf}(\xi_\phi)}{\exp(-\xi_\phi^2)} = \frac{1}{2} \frac{C_p(T_f - T_v)}{L_w\phi + C_p(T_v - T_0)} \quad (7.4.2)$$

式 7.4.2 は、 ξ_ϕ について陽に解けないので、初等関数による近似式を示した。

$$\xi_\phi = 0.26 \log_e \left\{ \frac{1}{2} \frac{C_p(T_f - T_v)}{L_w\phi + C_p(T_v - T_0)} \right\} + 0.81 \quad \{0.4 \leq \xi_\phi \leq 1.23\} \quad (7.4.3)$$

これにより蒸発到達時間 t_{ξ_ϕ} は含水率の関数で単純に表わされ、これを用いて、蒸発完了時間の簡易予測式を示した。

$$t_{\xi_\phi} = \left(\frac{1}{\xi_\phi} \cdot \frac{x}{2\sqrt{\alpha}} \right)^2 \quad (7.4.4)$$

また、乾燥壁の非定常温度分布から水分蒸発の影響を差し引くことで、含湿壁の非定常温度分布を求める簡易予測式を提案した。

$$\frac{\Delta T_{wet}(x, t)}{\Delta T_f} = \frac{\Delta T_{dw}(x, t)}{\Delta T_f} - \frac{\text{erfc}(\xi_\phi) - \frac{\Delta T_v}{\Delta T_f}}{\xi_\phi} \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \quad (\Delta T(x, t) \geq \Delta T_v) \quad (7.4.5)$$

$$\frac{\Delta T_{wet}(x, t)}{\Delta T_f} = \text{erfc} \left\{ \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + (\xi_{dw} - \xi_\phi) \frac{2 - \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}}{2 - \xi_\phi} \right\} \quad (\Delta T(x, t) < \Delta T_v) \quad (7.4.6)$$

7.5 簡易予測式の適用範囲に関して

最後に、本研究で提案した簡易予測式の適用範囲について記す。

・表面温度を加熱温度で近似できる適用範囲について、評価対象とする時間 t_r に対する t' （表面温度の無次元温度が 0.9 に達する時間）の比が 1/10 以下になることを適用条件として、以下のように示した。

$$t_r \geq \frac{0.49 \times 10^{20} \cdot \lambda \rho C_w}{T_f^6} \quad (7.5.1)$$

・半無限固体として近似できる適用範囲について、非加熱側表面を外気に開放した場合については、非加熱側表面での無次元温度上昇が 0.1 に達するまで、非加熱側表面を断熱パッドで覆った場合には、非加熱側表面での無次元温度上昇が 0.2 に達するまでとした。

・熱拡散率について、熱拡散率が厚さ方向に一定となる単層壁に対してのみ適用できる。そのため熱拡散率の異なる材料が複層した壁については適用できない。また、熱拡散率について温度依存性が大きくなるような材料については注意が必要である。

・木質系の材料や発泡性耐火塗料のように加熱に応じて厚さが変化していくような材料に対しては適用できない。

・力学的な考察は行っておらず、面材のひび割れや脱落の影響が認められる温度域には適用できない。

7.6 結論

これまで耐火試験に代表される区画火災に曝される区画壁の温度上昇予測は、主に数値解析により行われてきた。中でも水分の影響については、水分を多少なりとも含む建材は多く、温度測定を行うと温度停滞として現れるため、蒸発潜熱が遮熱性能に与える影響は大きいとされてきた。

本論は、この水分蒸発の影響について簡易予測式を示すことで、含湿壁の水分蒸発の影響が、従来考えられていたような、温度上昇を遅らせる蒸発時間という時間だけではなく、非定常温度分布の変化として空間的にも現れることを明らかにし、含湿壁の温度上昇を簡易的に予測する手法を示したものである。またこのような簡易予測式の特徴は、どんな物理量がどの程度温度上昇に関連しているかが分かりやすい点にあり、複雑な数値解析モデルによらずとも簡易予測式を用いてある程度温度上昇時間を予測することができるのは大きな利点である。

謝辞

本論文の審査にあたり、御多忙の中、貴重なお時間を割いていただきました主査 田中哮義教授、副査 銚井修一教授、副査 原田和典教授に深く御礼申し上げます。

まずなにより、働きながら社会人ドクターとして研究を続けてこられましたのも、那珂正理事長、二木幹夫所長をはじめとするベターリビング職員皆様のご協力と温かいご支援のお陰です。特に親身に相談に乗って頂きました遊佐秀逸研究審議役、毎日の業務の中で励まし支えてくださった防耐火性能試験研究部の吉川利文部長、金城仁氏、福田泰孝氏、橋本房子氏には、心より御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、大勢の方に大変お世話になりました。

建築研究所の萩原一郎先生、増田秀昭先生、吉田正志先生、成瀬友宏先生、五頭辰紀先生、鈴木淳一先生、山海敏弘先生には、深い洞察のものと的確なアドバイスを頂きました。日本建築総合試験所、建材試験センター、北海道立総合研究機構、日本住宅・木材技術センター、建築性能基準推進協会の諸兄には、貴重な情報を提供していただいたと同時に、多くのアドバイスを頂きました。この場をお借りして深く御礼申し上げます。

試験体製作に当たり、レイ・ウォール岩崎の岩崎邦弘氏、宮城建設の板垣孝氏、武藤氏、渡辺氏、谷中工業の谷中正紀氏、関氏、小川氏、東亜理科の柴崎氏、石田氏、三ツ木氏、三生技研の井口氏には多大なる助言・ご尽力を賜りました。この場を借りて深くお礼申し上げます。

そして本論文だけではなく、様々な場面でご指導と励ましを頂きました田中哮義先生、室崎益輝先生、松下敬幸先生、北後明彦先生、James G Quintiere 先生、Arnourd Trouve 先生には、この場をお借りして改めて厚く御礼申し上げます。

最後になりましたが、いつも私の身体を気遣い、支えてくださりました両親と妻に深く感謝しております。

また幼少の頃、共働きの両親に代わり、私達姉弟の面倒を見て頂いた祖母へ。私が悪さをする度に、「灸（やいと）をするぞ」とマッチを擦ってかざされたときのこと、今も覚えていらっしやいますでしょうか。あのときに感じた火への恐怖心と征服欲が、今もって私を成長させてくれているのだと感じております。どうもありがとうございました。

引用・参考文献

- (1) 読売新聞, 2007.11.2
- (2) 若松孝旺, 火災時における建物部材の内部温度算定に関する研究(第1報)ー算定式の誘導, 算定条件および算定要素ー, 日本建築学会論文報告集, 第109号, 1965
- (3) 若松孝旺, 火災時における建物部材の内部温度算定に関する研究(第2報)ー算定式の解法ー, 日本建築学会論文報告集, 第111号, 1965
- (4) 松本衛, 助飛羅力, 森下登美雄, 強加熱時における壁体内熱水分移動の数値解析, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 1975
- (5) 原田和典, 寺井俊夫, コンクリート壁の耐火性能に及ぼす調合と含水率の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第481号, 145-151, 1996
- (6) 2001年版耐火性能検証法の解説及び計算例とその解説, 井上書院, 2001
- (7) 原田, 寺井, 藤川, 吉田, 田坂, 表, 火災時における合成床版のコンクリート内部温度に関する研究(その4)耐火試験結果に影響を及ぼす各種要因の感度解析, 日本建築学会大会, 1988
- (8) Ramachandran VS, Paroli RM, Beaudoin JJ, Delgado AH. Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials. Noyes Publication, William Andrew Publishing: Norwich, NY, 2003
- (9) 田中哮義, 建築火災安全工学入門, 日本建築センター, 2002
- (10) 防耐火性能試験・評価業務方法書, 財団法人ベターリビング, 2000
- (11) Samuel Manzello, Tensei Mizukami : Measurement of Thermal Properties of Gypsum Board at Elevated Temperature, 5th International Conference on Structures in Fire, 2008
- (12) 防火対象物の総合防火安全評価基準のあり方検討会報告書, 総務省消防庁予防課, 2005.3
- (13) 吉野石膏パンフレット
- (14) 安井昇ら, 伝統町家における軸組木造土壁の載荷加熱実験, 日本建築学会技術報告集, 第18号, 2003
- (15) 西田一郎, 増田秀昭, 安井昇, 長谷見雄二, 伝統的木造建築物を保全するための準耐火構造試験, 日本建築学会大会, 2008
- (16) 原田, 寺井, 火災時のコンクリート内部の熱水分移動のモデル, 日本建築学会構造系論文集, 第477号, 185-190, 1995
- (17) T.Z.Harmathy, Fire Test Standard in the Light of Fire Research, Fire Test Performance, ASTM STP 464, 85-97, 1970
- (18) European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structures, European Convention for Constructional Steelwork (ECCS), 1983
- (19) 横林修造, 佐藤真奈美, 伝統技能によって施工される材料の熱・湿気特性に関する考察, 日本建築学会環境系論文集, 第630号, 965-969, 2008
- (20) 横林修造, 佐藤真奈美, 兵庫県産左官材料の熱・湿気特性に関する考察 第2報 数値解析による土壁の断熱・吸放湿性能の検討, 日本建築学会学術講演梗概集(関東), 5-6, 2006

-
- (21)宮野則彦, 宮野秋彦, 和壁の熱伝導特性に関する考察, 熱物性, Vol.21, 193-199, 2007
 - (22)国土交通省告示第 1641 号第 11 第三号イ, 2001
 - (23)Lazaros D. Tsantaridis and Birgit A.-L. Östman, Charring of Protected Wood Studs, Fire and Materials, Fire Mater. 22, 55-60, 1998
 - (24)Lazaros D. Tsantaridis and Birgit A.-L. Östman, Short Communication Fire Protection of Wood by Different Gypsum Plasterboards Fire and Materials, Fire Mater. 23, 45-48, 1999
 - (24)齋藤武雄, 移動境界伝熱学, 養賢堂, 1994
 - (25)James G Quintiere, Fundamentals of Fire Phenomena, Wiley, 2006
 - (26)Requirements For Thermocouple Pads, ASTM E119-00a, 2002
 - (27)秋田一雄, 燃焼概論, コロナ社, 1982